



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Kalhous Jméno: Tomáš Osobní číslo: 409822
Zadávací katedra: Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Posouzení spojů dřevěných konstrukcí na účinky požáru

Název diplomové práce anglicky: Assessment of joints of timber structures exposed to fire

Pokyny pro vypracování: CÍLEM DIPLOMOVÉ PRÁCE JE VYPRACOVÁNÍ ANALYTICKÉ A NUMERICKÉ ANALÝZY VYBRANÝCH SPOJŮ OCEL-DŘEVO A PŘÍPRAVA A VYHODNOCENÍ POŽÁRNÍHO EXPERIMENTU

Seznam doporučené literatury: SKRIPTA KATEDRY K134 A PŘÍSLUŠNÉ NORMY EN

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Lukáš Blesák, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 2.10.2017 Termín odevzdání diplomové práce: 7.1.2018
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

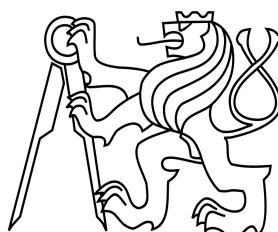
Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí



Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb

DIPLOMOVÁ PRÁCE
POSOUZENÍ SPOJŮ DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍ
NA ÚČINKY POŽÁRU

ASSESSMENT OF JOINTS OF TIMBER STRUCTURES EXPOSED TO FIRE

Bc. Tomáš Kalhous

vedoucí práce: Ing. Lukáš Blesák, Ph.D.

2017-2018

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Posouzení spojů dřevěných konstrukcí na účinky požáru“ vypracoval samostatně pod odborným vedením Ing. Lukáše Blesáka, Ph.D. a informace jsem čerpal z uvedené literatury.

V Praze dne 5. ledna 2017

.....
Podpis

Poděkování

Rád bych poděkovat Ing. Lukášovi Blesákovi, Ph.D. za odborné vedení při tvorbě této diplomové práce. Také bych chtěl poděkovat všem přátelům a rodině za podporu během studia.

Obsah

| | |
|---|------------|
| Abstrakt | V |
| Abstract | VI |
| Seznam použitých symbolů a zkratk | VII |
| Motivace | IX |
| 1 Úvod | 1 |
| 2 Spoje dřevěných konstrukcí | 2 |
| 2.1 Ocelové spojovací prostředky kolíkového typu | 2 |
| 2.1.1 Hřebíky | 2 |
| 2.1.2 Svorníky | 3 |
| 2.1.3 Kolíky | 4 |
| 2.1.4 Vrutky | 4 |
| 2.2 Hmoždíky | 5 |
| 2.3 Spoje s deskami s prolisovanými trny | 6 |
| 2.4 Spoje s tvarovými součástmi z ocelového plechu | 6 |
| 3 Rekonstrukce dřevěných konstrukcí | 8 |
| 3.1 Poruchy dřevěných konstrukcí | 8 |
| 3.1.1 Požerkové poškození dřeva od hmyzu | 9 |
| 3.1.2 Hnilobné a plísňové poškození dřeva houbami | 9 |
| 3.1.3 Poškození dřeva vlivem povětrnosti | 10 |
| 3.1.4 Tvarové deformace dřeva | 10 |
| 3.2 Opravy a sanace dřevěných konstrukcí | 11 |
| 3.2.1 Příložkové a výškové nastavování | 12 |
| 3.2.2 Aplikace uhlíkových vláken | 13 |
| 3.2.3 Protézování | 13 |
| 3.2.4 Plombování | 15 |
| 4 Chování dřevěných a ocelových konstrukcí za požáru | 16 |
| 4.1 Požární odolnost | 16 |
| 4.2 Výpočetní metody požární odolnosti | 17 |
| 4.3 Chování dřevěných konstrukcí za požáru | 19 |
| 4.3.1 Hloubka zuhelnatění dřeva | 21 |
| 4.3.2 Návrh redukováného průřezu prvku | 21 |
| 4.4 Chování ocelových konstrukcí za požáru | 22 |
| 4.4.1 Mechanické vlastnosti oceli při požáru | 22 |
| 5 Velkorozměrová požární zkouška | 26 |
| 5.1 Výstavba experimentálního objektu | 27 |
| 5.2 Provedení velkorozměrové požární zkoušky | 30 |
| 5.2.1 Příprava experimentálních trámů | 30 |
| 5.2.2 Usazení termočlánku do experimentálních trámů | 32 |
| 5.2.3 Provedení velkorozměrové požární zkoušky | 34 |
| 5.2.4 Výsledky z velkorozměrové požární zkoušky | 39 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5.3 | Analytický výpočet | 44 |
| 5.3.1 | Návrh spoje s dvěma ocelovými příložkami | 45 |
| 5.3.2 | Výpočet hloubky zuhelnatění experimentálního trámu | 50 |
| 5.4 | Posouzení spojů pomocí softwaru Atena | 52 |
| 5.4.1 | Postup výpočtu pro spoj pomocí ocelových příložek | 52 |
| 5.4.2 | Postup výpočtu pro spoj pomocí ocelových L-profilů..... | 60 |
| 5.4.3 | Výsledky z teplotní analýzy softwarem Atena | 60 |
| 5.5 | Porovnání výsledků z velkorozměrové požární zkoušky s výsledky z modelových metod | 64 |
| 5.5.1 | Porovnání velkorozměrové požární zkoušky se softwarem Atena | 64 |
| 5.5.2 | Porovnání velkorozměrové požární zkoušky s analytickým výpočtem..... | 69 |
| 5.5.3 | Porovnání analytického výpočtu se softwarem Atena | 72 |
| 6 | Závěr | 77 |
| | Seznam obrázků | 78 |
| | Seznam tabulek | 80 |
| | Seznam grafů | 80 |
| | Literatura | 82 |

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na problematiku chování spojů dřevěných konstrukcí na účinky požáru. V této práci jsou hodnoceny dva rozdílné typy spojů pomocí ocelových prvků. První, konzervativnější spoj je tvořen pomocí ocelových plechů spojených skrze dřevěný trám ocelovými svorníky. Druhý spoj je tvořen pomocí vlepených ocelových „L“ profilů po celé délce trámu. Oba spoje podstoupily velkorozměrovou požární zkoušku. Hlavním výsledkem této práce je posouzení, který druh spoje je na účinky požáru efektivnější a určení rychlosti zuhelnatění dřeva za ocelovým prvkem. Výpočty jsou řešeny analyticky, zároveň i pomocí výpočetního softwaru ATENA a porovnány s výsledky velkorozměrové požární zkoušky.

Klíčová slova

požár; zkouška; dřevo; spoj

Abstract

The master's thesis is focused on the behavior of joints of timber structures exposed to fire. In this work, two different types of joints with using steel elements are evaluated. First of them, more conservative joint is formed by using steel sheets, which is bonded through the timber beams with steel pins. The second joint is formed by using glued steel "L" profiles along the length of the beam. Both joints were expose to fire experiment. The main result of this work is assessed which type of joint is more effective on exposing fire and to determine the rate of carbonization of the wood behind the steel element. Calculations are solved analytically and as well with computing software ATENA and compared with fire experiment's results.

Keywords

fire, experiment; timber; joint

Seznam použitých symbolů a zkratek

Latinské symboly

| | | |
|--------------|---|-------------------------------------|
| A | Plocha | m^2 |
| c | Měrná tepelná kapacita | $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ |
| d_{cha} | Tloušťka odhořívání | mm |
| d_{ef} | Efektivní tloušťka průřezu | mm |
| d_0 | Tloušťka s nulovou pevností | mm |
| h_{net} | Čistý tepelný tok | W/m^2 |
| k_0 | Upravující součinitel | $[-]$ |
| t | Doba vystavení požáru | min, sec |
| k_{sh} | Součinitel zastínění | $[-]$ |
| A_m/V | Součinitel průřezu | m^{-1} |
| f | Liniové návrhového zatížení | kN/m |
| $k_{mod,fi}$ | Modifikační součinitel pro požár | $[-]$ |
| n_{1r} | Počet spojovacích prostředků v jedné řadě | $[-]$ |
| n_{sr} | Počet stříhů | $[-]$ |
| l | Délka dřevěného prvku | m |
| $f_{h,0,k}$ | Charakteristická pevnost v otláčení | MPa |
| k_{90} | Součinitel pro namáhání | $[-]$ |
| $M_{y,Rk}$ | Plastický moment únosnosti | kNm |
| E_d | Síla vyvolaná vlivem zatížení | kN |
| $F_{v,Rd}$ | Návrhová únosnost | kN |

Řecké symboly

| | | |
|-----------------|---|------------------------------------|
| λ | Součinitel tepelné vodivosti | $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ |
| ρ | Objemová hmotnost | kg/m^3 |
| β_0 | Rychlost odhořívání dřeva | mm/min |
| $\gamma_{M,fi}$ | Dílčí součinitel spolehlivosti materiálu při požáru | $[-]$ |
| γ_M | Dílčí součinitel spolehlivosti materiálu | $[-]$ |

| | | |
|-----------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| ε | Poměrné protažení, emisivita | [-] |
| ρ_a | Hustota oceli | kg/m ³ |
| α_c | Součinitel přestupu tepla prouděním | W/m ² K |
| θ_g | Teplota plynu | °C |
| θ_m | Teplota oceli | °C |
| Φ | Účinek zastínění | [-] |
| σ | Stephan-Boltzmannova konstanta | W/m ⁴ K ² |
| η | Redukční součinitel | [-] |
| μ_0 | Stupeň využití | [-] |
| $\theta_{a,cr}$ | Kritická teplota oceli | °C |

Zkratky

| | |
|-------|---|
| tzv. | takzvaný |
| např. | například |
| OSB | Oriented strand board |
| apod. | a podobné; a podobně |
| UCEEB | Univerzitní centrum energeticky efektivních budov |
| ATENA | Advanced tool for engineering nonlinear analysis |
| PÚ | požární úsek |
| HZS | hasičský záchranný sbor |
| GiD | Global innovation design |

Motivace

V rámci požární bezpečnosti staveb existuje ještě stále mnoho ne zcela vyřešených neznámých. Ať se jedná o pasivní požární bezpečnost, jako jsou požární odolnosti jednotlivých konstrukcí nebo reakce materiálů na oheň, tak aktivní požární bezpečnost, jako detekce požáru či automatická hasicí zařízení. Všude je mnoho věcí, které je potřeba upravovat, zdokonalovat nebo vytvářet.

V dnešních normách zabývajících se požární bezpečností staveb se vyskytuje spousta užitečných věcí, které se dají dobře aplikovat do jednotlivých projektů. Bohužel každý, kdo se zabývá touto tematikou, se určitě při projektování potkal s problémem, že normy nedokázaly dostatečně popsat či vysvětlit určitý jev. Jednomu takovému problému jsem se rozhodl věnovat v této práci.

Představme si, že je potřeba opravit část degradovaného dřevěného prvku krovu. Lze vyměnit celý krovový prvek a nahradit jej jiným dřevěným prvkem, nebo instalovat podpůrnou konstrukci, která však rozhodně není estetická, a ne vždy úplně použitelná, z důvodu potřeby většího prostoru pro instalaci. Jako nejšetrnější řešení přichází využití tzv. „protézy“, kdy část trámu je odstraněna, nahrazena novým a upevněna pomocí spojovacích prvků. Ne vždy se striktně musí jednat jen o nahrazení degradované části, protézu lze uplatnit při rekonstrukcích nebo úpravách dispozic. Tak jako tak přichází problém hodnocení takového spoje z hlediska požární bezpečnosti a české technické normy na tento problém nemají uspokojivou odpověď. Zejména pak rychlost zuhelnatění dřeva za spojovacím materiálem, které je velkým ukazatelem požární odolnosti prvku.

Problematika spojů dřevěných prvků nebyla zatím dostatečně řešena a modelována a tím by tato práce mohla být zajímavým přínosem k problematice požární odolnosti dřevěných konstrukcí. Díky vypsání grantu univerzitou ČVUT jsem se rozhodl zpracovat a realizovat experiment s dřevěnými prvky vystavenými požáru při velkorozměrové požární zkoušce, která bude sloužit pro ověření chování jednotlivých typů spojů dřevěných prvků a pro validaci současně vyvíjených matematických modelů.

Věřím, že provedený experiment a vyvinutý matematický model pomohou při dalších návrzích dřevěných spojů zejména s ohledem na efektivitu návrhu.

1 Úvod

Použitelnost a trvanlivost dřevěných konstrukcí je závislá také na návrhu spojů mezi jednotlivými konstrukčními prvky. Pro výběr správného druhu spojovacího prostředku se nehodnotí pouze velikost zatížení či únosnost, ale i hledisko estetické, ekonomické nebo výrobní. Při stanovení typu spoje se také zohledňují záměry projektanta a architekta. Z těchto důvodů není možné při výběru spojovacího prostředku zvolit obecně daná pravidla, pomocí kterých by bylo možné navrhnout univerzální spoj pro různé druhy konstrukcí.(1)

V této práci se nebudeme zabývat pouze návrhem a posouzením spojů dřevěných konstrukcí za běžné teploty, ale zejména návrhu za zvýšené teploty. Spojovacích prostředků je mnoho, ale málokteré jsou vhodné použít při zvýšeném požárním riziku. Při návrhu za zvýšené teploty u spojovacích prvků musíme zohledňovat jejich tepelnou vodivost. Čím větší bude tepelná vodivost, tím se bude spojovací prostředek ohřívat rychleji. Právě pro vysokou tepelnou vodivost oceli jsou spoje dřevěných konstrukcí pomocí ocelových prvků z požárního hlediska velice nebezpečné. Jedním takovým nebezpečným spojem je např. deska s prolisovanými trny tzv. Gang Nail, který je dnes hojně užíván pro své statické kvality a efektivitu výstavby. Bohužel plech při zvýšené teplotě velmi rychle ztrácí tvarovou stálost a dochází ke kolapsu konstrukce. Z toho vyplývá, že při spojích dřevěných konstrukcí je nutné posuzovat požární odolnost samotného trámu, ale i spojovacího prostředku. Kombinací posouzení spoje i trámu jsme schopni navrhnout kvalitní a spolehlivou konstrukci, která bude funkční jako celek.(2)

V rámci vypsání grantu univerzitou ČVUT se v areálu UCEEB v Buštěhradě konala velkorozměrová požární zkouška slaměného objektu. Tato práce se zaměřuje na posouzení dvou typů spojů dřevěných konstrukcí, jež byly vystaveny požáru právě ve zmíněném objektu. Jedná se o typ spoje pomocí ocelových plechů spojených skrze dřevěný trám ocelovými svorníky a o spoj, který je tvořen pomocí vlepených ocelových „L“ profilů po celé délce trámu. Při požární zkoušce se měřilo rozložení teplot po průřezu, kde jsme sledovali rozdíly zuhelnatění dřeva pod oběma spojujícími ocelovými prostředky. Tyto výsledky byly vyhodnoceny a porovnány s výsledky stanovenými softwarem ATENA a analytickým výpočtem.

2 Spoje dřevěných konstrukcí

K základům navrhování dřevěných konstrukcí patří výběr správného nosného systému, správné navržení jednotlivých konstrukčních prvků a snadná montáž konstrukce. Správnost návrhu konstrukce je dána také správným zvolením jednotlivých typů spojovacích prostředků. Hlavní zásadou pro navržení kvalitní dřevěné konstrukce by mělo být použití jednoduchých spojů a nízkého počtu typů spojovacích prostředků. Spoje se dělí do dvou typů, a to na tesařské spoje, kterým se v této práci nebudeme věnovat, a mechanické spoje, které jsou prováděny pomocí různých spojovacích prostředků.(4)

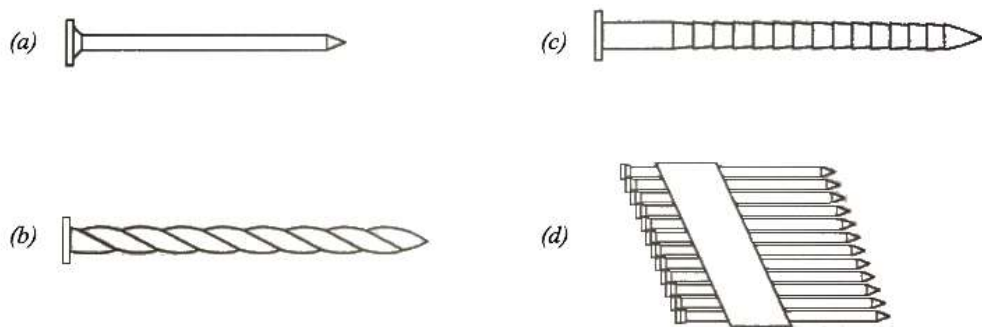
Tradiční mechanické spojovací prostředky pro dřevo můžeme rozdělit do dvou základních skupin dle způsobu přenosu síly mezi konstrukčními prvky. První skupinou jsou tzv. kolíkové spojovací prostředky, u nichž je při přenosu síly vyvozován jak ohyb kolíku, tak i napětí v otlacení stěny otvoru a smykové napětí dřeva podél dřívku. Do této skupiny patří svorníky, kolíky, hřebíky, vruty a sponky. Druhou skupinou jsou „povrchové“ spojovací prvky, jako jsou styčnickové desky s prolisovanými trny nebo vkládané a zalisované hmoždíky. Je možnost spoje kombinovat se speciálními ocelovými prvky.(4)

2.1 Ocelové spojovací prostředky kolíkového typu

Jsou při přenosu sil ohýbány a zatlačovány do dřeva. Jejich únosnost při příčném namáhání je závislá na ohybové tuhosti a na pevnosti dřeva v otlacení pod dřívkem.(5)

2.1.1 Hřebíky

Hřebíky jsou nejčastěji používaný spoj dřevěných konstrukcí, který se hojně využívá u mnoha konstrukčních prvků, jako jsou např. výztužné tabule, výztužné stěny a příhradové nosníky. Jsou vyráběny ve značném množství velikostí, tvarů a také materiálů. U dřevěných konstrukcí jsou nejvíce rozšířeny kruhové drátěné hřebíky, ale vyrábí se i speciální typy hřebíků (Obr. 1). Rozměry hřebíků podléhají evropským standardizovaným rozměrům.(4)



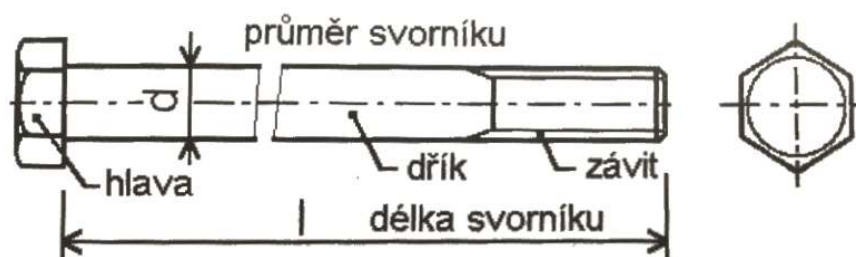
Obr. 1 Tvary hřebíků: (a) kruhový drátěný hřebík, (b) šroubový hřebík, (c) drážkový hřebík, (d) zásobník hřebíků pro strojní zařízení (4)

Při výrobě hřebíkových spojů může být potřeba předvrtat otvory pro hřebíky z důvodu zamezení rozštěpu dřeva, a to zejména v případě listnatých stromů. U jehličnatých je potřeba předvrtat otvor pro hřebík u douglasky a modřínu. Otvor by neměl být větší než 80 % průměru hřebíků.(4)

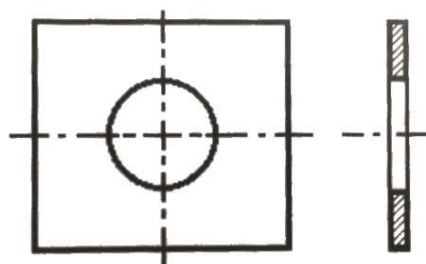
Hřebíkové spoje dřevěných konstrukcí se používají převážně pro jednostřížné přípoje dřevěných či ocelových částí konstrukce. Pro zvýšení únosnosti při namáhání na stříh je možnost použití hřebíku se čtvercovým průřezem nebo zapuštění ocelových plechů do konstrukce a zarážení hřebíku skrz plech (tloušťky do 2 mm) bez předvrtání. Pro zvýšení únosnosti ve stříhu i proti vytažení lze použít speciální druhy hřebíků s profilovaným dříkem (Obr. 1).(4)

2.1.2 Svorníky

Svorníky se šestihrannou nebo čtvercovou hlavou a maticí se převážně vyrábějí z běžné oceli. V praxi se nejčastěji používají průměry 10, 12, 14, 16, 20 nebo 24 mm. Svorník je opatřen hlavou, metrickým závitem na části dříku pro matici a na každé straně se vkládá podložka (Obr. 2). Pro malé síly postačí podložka kruhová, ale pro větší zatížení musí být použita podložka čtvercového tvaru (Obr. 3). Je dovoleno předvrtávat pro svorníky otvor o 1 mm větší, než je průměr dříku. Tato vůle snižuje únosnost spoje.(4)(5)



Obr. 2 Svorník pro dřevěné konstrukce (5)

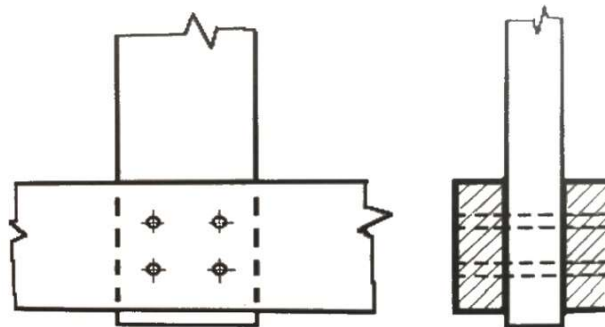


Obr. 3 Čtvercová podložka pro svorník (5)

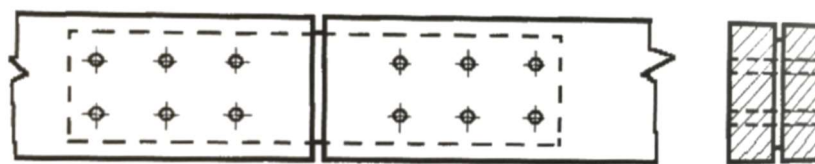
Svorníky se mohou použít také pro spojování ocelových plechů se dřevem. Také lze svorník použít pro spojení konstrukcí v kombinaci s jiným spojovacím prostředkem. Svorníkové spoje by se měly zhruba po dvou letech dotáhnout. V Česku se v dnešní době využívají téměř výhradně „závitové tyče“, které mají délku 1 m a závit po celé délce dříku.(5)

2.1.3 Kolíky

Kolíky jsou štíhlé ocelové válcové tyče s hladkým povrchem. Nejmenší průměr je 6 mm, používají se však i průměry do 30 mm. Pomocí tohoto spojovacího prostředku se zhotovují spoje „dřevo – dřevo“ (Obr. 4), ale lze je používat i pro spoj „ocel – dřevo“ (Obr. 5). Dle nutnosti lze použít i více plechů. Počet kolíku by neměl být menší než čtyři. Do dřevěného prvku se předvrtává otvor pro kolík, který by však neměl mít průměr větší, než je průměr kolíku. Při užití spoje „ocel – dřevo“ lze mít průměr otvoru v plechu větší, než je průměr kolíku, avšak ne více než o 1 mm.(5)



Obr. 4 Kolíkový spoj „dřevo – dřevo“ (5)



Obr. 5 Kolíkový spoj „ocelový plech – dřevo“ (5)

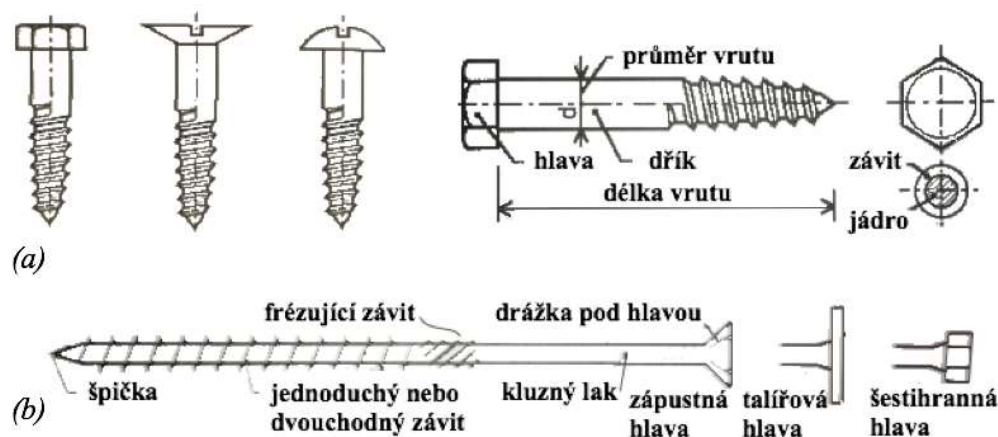
Pomocí vloženého plechu můžeme napojit dřevo i na ocel, nebo na beton. Kolíky jsou namáhané příčně a jsou částečně deformované. Při užití kolíků u větších spojů jsou některé kolíky nahrazeny svorníky. Kolíkové spoje jsou velice účinné pro přenos velkých sil. V Česku není tento spoj příliš užívaný.(5)

2.1.4 Vrutý

Vrutý se zpravidla využívají na jednostranné spoje. Používají se k připojování ocelových přílozek, třmenů a pro připojení desek (dřevotřískové, OSB apod.) ke dřevu, u kterých se využívají vrutý se zapuštěnou hlavou. Hlavní výhoda vrutů je jejich účinnost při namáhání na vytržení. V případech, kdy hrozí chvění konstrukce nebo větší pracování dřeva, jsou vrutý využívány místo spojů hřebíkových.(5)

Dnes se vrutý rozdělují na vrutý klasické a na vrutý stavební (Obr. 6). Pod názvem stavební vrutý se dnes vyrábějí různé typy vrutů, které mají převážně stejný průměr dřívku po celé délce a mají všestranné využití. Některé stavební vrutý mají na svém dřívku dvouchodý závit, který

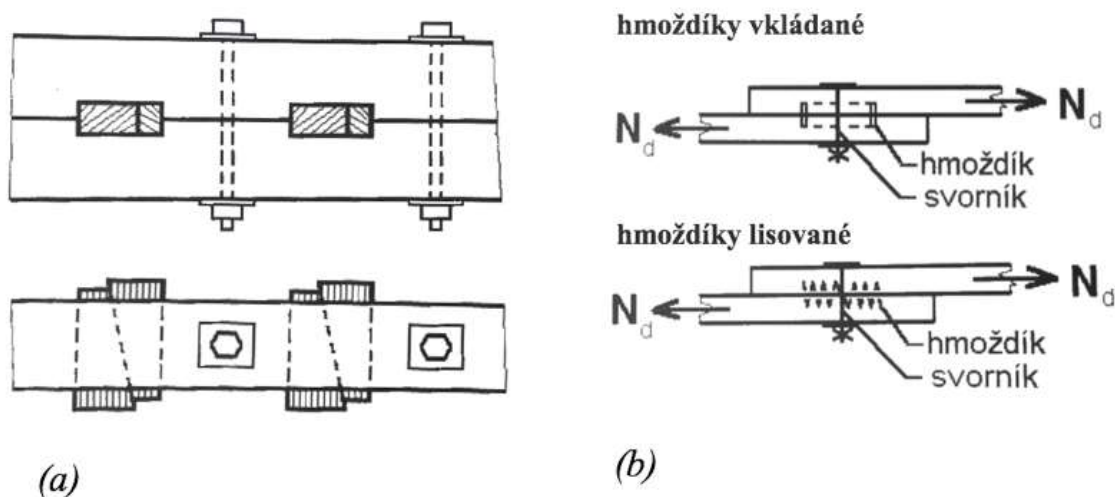
umožňuje rychlejší zašroubování a frézující závit, který odstraňuje materiál, který by se při zašroubování vrátil na původní místo a tím snížil tření na dřívku.(5)



Obr. 6 (a) Klasický vrt, (b) Stavební vrt (5)

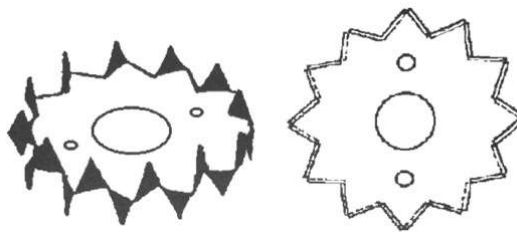
2.2 Hmoždíky

Hmoždíky se zapouštějí do spojovaných dřev proto, aby zabránily jejich vzájemnému posunutí. Jsou namáhány převážně na smyk. Hmoždíky se vždy doplňují stahovacími svorníky. Hmoždíky dělíme na tradiční dřevěné, které se dělí dle orientace vláken na podélné a příčné (Obr. 7a). Tyto hmoždíky se vkládaly mezi dřeva do předem připravených zářezů, do kterých musely přesně zapadat. Byly vyrobeny převážně z tvrdého dřeva. Druhým typem jsou kovové hmoždíky.(5)



Obr. 7 (a) Hmoždíky dřevěné, (b) hmoždíky kovové (5)

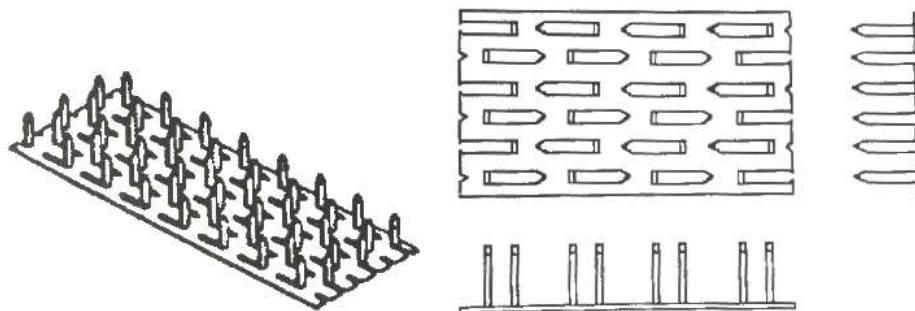
Kovové hmoždíky se dělí na vkládané a lisované. Vkládané hmoždíky se vkládaly do předem připravených drážek ve dřevu (Obr. 7b). V dnešní době se však tyto typy téměř nepoužívají. Lisované hmoždíky se do spojovacích prvků zatlačují (Obr. 7b). Zatlačení do dřeva se provádí buď lisem, nebo pomocí svorníku s vysokou pevností. V České republice se používají hmoždíky typu Bulldog (Obr. 8).(5)



Obr. 8 Hmoždiky typu Bulldog oboustranné (5)

2.3 Spoje s deskami s prolisovanými trny

Desky s prolisovanými trny neboli „gang nail“ mají jednostranně prolisované trny (Obr. 9). Nosné konstrukce spojené tímto spojem jsou charakteristické výrobou mimo staveniště ve výrobní hale. Při výrobě jsou dřevěné prvky upraveny pomocí úhlové pily a spojeny zalisováním desek pomocí lisu z obou stran spoje. Poprvé byly desky využity před 50 lety v USA. (6)(5)



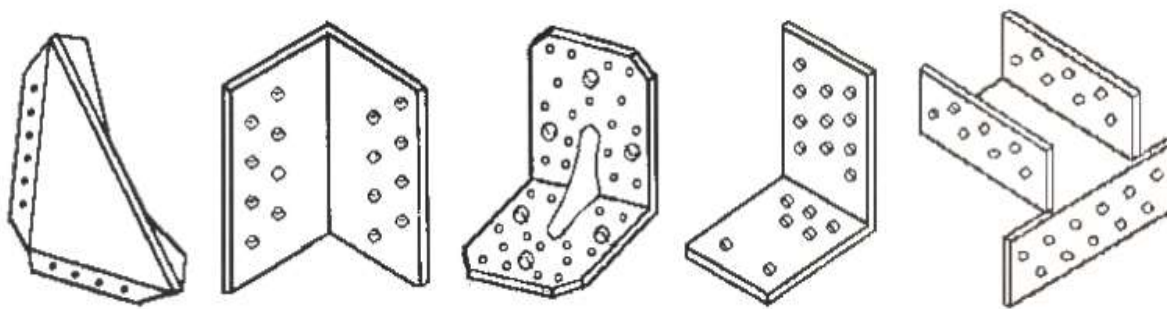
Obr. 9 Deska s prolisovanými trny (5)

Tento druh spojovacího prostředku je v dnešní době velice efektivní způsob náhrady klasických tesařských spojů. Používají se převážně pro příhradové konstrukce. Lze používat menší tloušťky řeziva oproti klasickým spojům. Tyto konstrukce jsou levné a mají velice dobré užitné vlastnosti. Spoje pomocí desek s prolisovanými trny mají tuhost, která je po lepených spoích jedna z nejvyšších při spojování dřevěných konstrukcí. (6)(5)

Bohužel tento spojovací prostředek má významnou nevýhodu, a tou je požární odolnost. Při zvýšené teplotě plech velmi rychle ztrácí tvarovou stálost a únosnost, tím dochází ke kolapsu konstrukce již po několika minutách.(2)

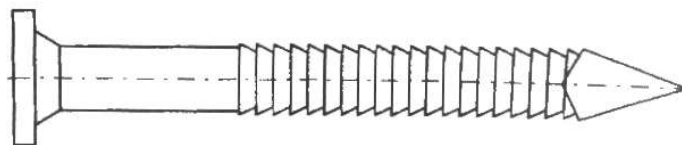
2.4 Spoje s tvarovými součástmi z ocelového plechu

Tvarové součásti z ocelového plechu umožňují spojovat dřevěné konstrukce obdélníkových průřezů tzv. na sraz. Využívají se především jako patky nosníku a ke spojení dvou trámů skrze tzv. trámové spojky a úhelníkové spojovací prostředky pro spojení křížujících se dřevěných prvků (Obr. 10).(5)



Obr. 10 Spoje s tvarovými součástmi (5)

Tvarové součásti jsou vyrobeny většinou tak, že únosnost součásti je větší, než je únosnost všech hřebíků. Z toho vyplývá, že při návrhu spoje se určuje jen počet hřebíků, které jsou namáhány na střih. Ke spojení součástí s dřevěným prvkem se využívají tzv. konvexní (kroužkové) hřebíky (Obr. 11), které mají pod hlavou kuželovou úpravu pro vyplnění mezery mezi otvorem plechu a hřebíkem. Tím je zamezen pohyb plechu vůči hřebíkům.(5)



Obr. 11 Konvexní (kroužkový) hřebík (5)

3 Rekonstrukce dřevěných konstrukcí

Udržování a obnova stávajících dřevěných konstrukcí je relativně nový obor. Odborník v tomto oboru se nazývá tzv. znalec dřeva. Úkolem znalce dřeva je prozkoumat každý prvek dřevěné konstrukce včetně spojů. Výstupem průzkumu je podání co nejpresnějších informací o vlastnostech, stavu a působení materiálu. Zároveň znalec musí zjistit co nejreálnější mezní hodnoty mechanických vlastností prvků dřevěné konstrukce. Z těmito informacemi dále nakládá statik ve svých výpočtech.(7)

Cíle průzkumu jsou následující:

- zjistit potřebné vlastnosti prvků k návrhu dostatečně tuhé a pevné dřevěné nosné konstrukce, která je nutná k zachování bezpečnosti a použitelnosti pro určené užití;
- označit úseky konstrukce, u kterých je zapotřebí výměnu, zesílení nebo jinou úpravu;
- stanovení biologické degradace, které byl prvek nebo část konstrukce vystavena po dobu své existence, a zdali by mohla ovlivnit vlastnosti prvku i v budoucnosti; doporučení opatření pro zabránění budoucímu výskytu těchto rizik;
- spolupráce se statikem při stanovení nosné způsobilosti dřevěné konstrukce; jestliže je konstrukce historickou, uměleckou či kulturní památkou, musí být zjištěna historie stavby a použitá technika výroby.(7)

Aby bylo těchto cílů dosaženo, znalec postupuje dle následujících kroků:

- určení druhu, mechanických a fyzikálních vlastností dřeva; zjištění vad a anomálií dřeva;
- zjištění biologické nebo mechanické degradace dřeva;
- určení částí konstrukcí s možností výskytu hniloby, nebo s jejím pravděpodobným výskytem v budoucnosti;
- stanovení pevností, tuhostí a účinných průřezů prvků dřevěných konstrukcí.(7)

3.1 Poruchy dřevěných konstrukcí

Na poruchách, poškozeních a zvětráváních dřevěných konstrukcí se podílejí abiotické i biotické činitele. Mezi abiotické činitele patří zejména atmosférické vlivy, agresivní chemikálie a vysoké teploty. V některých případech mohou dřevo poškodit i nevhodně použité ochranné prostředky. K biotickým patří hlavně dřevokazné houby, hmyz, bakterie, ale například i živočichové. Všechny tyto degradace vzniknou pouze tehdy, jestliže konstrukce nebyla dostatečně chráněna po dobu své existence.(8)

3.1.1 Požerkové poškození dřevo od hmyzu

Požerky ve dřevě vytváří dřevokazný hmyz. V kvalitním dřevě nesmějí být požerky od dřevokazných škůdců jako jsou tesaříci, dřevokazy, pilořitky, kůrovci, jádrohlodi, krasci apod. Larvy tohoto hmyzu napadají jen dřevo rostoucích stromů v lese, nebo přežívají v kůře skladované kulatiny. V odkorněném a zpracovaném dřevě se již dál nevyvíjejí. Z hlediska dřevěných konstrukcí jsou daleko nebezpečnější tzv. techničtí škůdci. Jejich larvy dokáží přežít ve vysušeném dřevě s vlhkostí na hranici 10 %. V Česku patří k nejnebezpečnějším tesařík krovový, který vytváří oválné požerky rozměru 7x12 mm, a tím rapidně snižuje mechanické vlastnosti dřeva (Obr. 12). V zahraničí, hlavně v jižních státech, pak k nejnebezpečnějším patří termiti, kteří napadají i dřevotřískové materiály.(8)



Obr. 12 Trám napadený tesaříkem (8)

3.1.2 Hnilobné a plísňové poškození dřeva houbami

Hnilobu dřevěných konstrukcí způsobují dřevokazné houby, které k rozvoji potřebují příhodné klimatické a substrátové podmínky. V praxi u neudržovaných konstrukcí se nejčastěji setkáme s hnědou hnilobou, kterou způsobují celulózožravé houby, např. dřevomorky, pornatky, trámovky apod. K dalším typům dřevokazných hub patří tzv. bílá hniloba, např. outkovka nebo klanolístka a v kontaktu s terénem pak měkké hniloby.(8)

Z důvodu napadení hnilobnými houbami se výrazně snižuje pevnostní a pružnostní charakteristiky napadené dřevěné konstrukce (Obr. 13). Například v počátečních fázích nákazy hnědé hniloby při úbytku 6 % hmotnosti dřeva klesá pevnost v tlaku o 16 %, v ohybu o 60 % a v tahu až o 70 %. V důsledku vysoké vlhkosti se můžeme setkat i s plísňovými nákazami. Následky jsou však spíše estetického charakteru.(8)



Obr. 13 Krokev napadané hnilobou (8)

3.1.3 Poškození dřeva vlivem povětrnosti

Na dřevěné konstrukce vystavené vnějšímu prostředí trvale působí UV záření, voda a ostatní povětrnostní vlivy. Tyto degradační vlivy odbourávají ze dřeva lignin a polysacharidy, avšak degradační doba je velice dlouhá. Například za 100 let se tloušťka smrkového nebo jedlového dřeva zmenší pouze o 4 až 10 mm.(8)

Pokud se ve dřevě vytvořila velká vlhkostní a teplotní napětí, povrch dřeva se zdrsňuje za vznikání mikrotrhlin a makrotrhlin (Obr. 14). Dřevo vystavené působení počasí mění i barvu, a to v závislosti na fotooxidovaných ligninů, které se deštěm vyplavují.(8)

Vlivem povětrnosti ale i špatným nanesením nátěrových systémů se poškozují i samotné ochranné nátěry a je nutné je obnovit.(8)



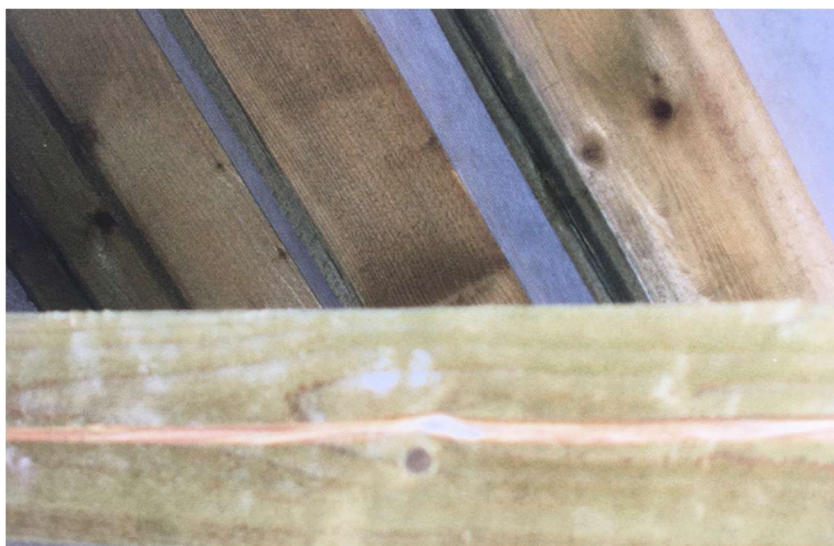
Obr. 14 Povrchové zvětrávání srubu (8)

3.1.4 Tvarové deformace dřeva

Dřevo je viskózně-elastický materiál, jehož tvary se mění vlivem vnějších sil při nadměrném zatížení. Dřevěné prvky mohou být ovlivněny změnami teplot a zejména vysycháním. Dřevo nabobtná nebo sesychá při změnách vlhkosti od 0 do 30 % a při tom se mění i jeho rozměry v tangenciálním směru (o 5-10 %), v radiálním (o 3-6 %), nejméně však v podélném (o 0,1-0,4 %).(8)

Tvarovým změnám způsobených změnou vlhkosti lze předejít použitím lazurovacích nebo jiných typů nátěrů, které zpomalují prostup vody ze dřeva ven a obráceně. Deformací v exteriéru nelze dostatečně zabránit a při návrhu konstrukcí ve styku s venkovním prostředím se s tyto deformace předpokládají. Avšak konstrukce v interiéru s téměř stabilním klimatem by měly být dostatečně stabilizované. Větší změny klimatu v exteriéru mohou mít za následek vážné poruchy

konstrukcí. Typickými poruchami jsou praskliny v dřevěných prvcích (Obr. 15), praskliny v místě spojů, poškození nátěrů.(8)



Obr. 15 Prasklina vlivem sesychání může být vstupní branou pro dřevokazný hmyz (8)

3.2 Opravy a sanace dřevěných konstrukcí

Zvolení správné metody opravy dřevěných konstrukcí je založeno na typu a velikosti degradace materiálu. V této kapitole se však oprostíme od způsobů, jakými lze odstranit příčiny vzniku poruch na dřevěných konstrukcích, kterými jsou např. odstraňování zdrojů vlhkosti, odebráním přebytečných zatížení nebo likvidací dřevokazných hub a hmyzu ve dřevě. Zaměříme se na radikální řešení oprav dřevěných konstrukcí, a to zejména na zpevňování konstrukčních prvků nebo náhradou poškozené části konstrukce.

Zpevňování dřevěných prvků se týká zejména prvků nosných. K tomuto řešení se přistupuje jsou-li konstrukce degradací oslabené natolik, že jim vlivem zatížení hrozí kolaps. Zesilování prvků je nutné i v případě rekonstrukce, kdy bude stávající dřevěná konstrukce namáhána větším zatížením. Zpevnění částí dřevěných konstrukcí se provádí několika způsoby:

- zvětšením průřezu dřevěného prvku, např. pomocí příložek nebo výškovým nastavením;
- aplikací uhlíkových lamel nebo rohoží z uhlíkových vláken;
- nahrazením poškozeného dřevěného prvku novým dřevem, nebo jiným materiálem bez zachování stávajícího průřezu, např. příložkováním nebo ukotvením do ocelové konzoly;
- nahrazením poškozeného dřevěného prvku novým dřevem, nebo jiným materiálem se zachováním stávajícího průřezu, např. protézováním, plombováním nebo konzervováním;
- trvalou změnou konstrukčního řešení, např. použití ocelových doplňujících prvků.(8)

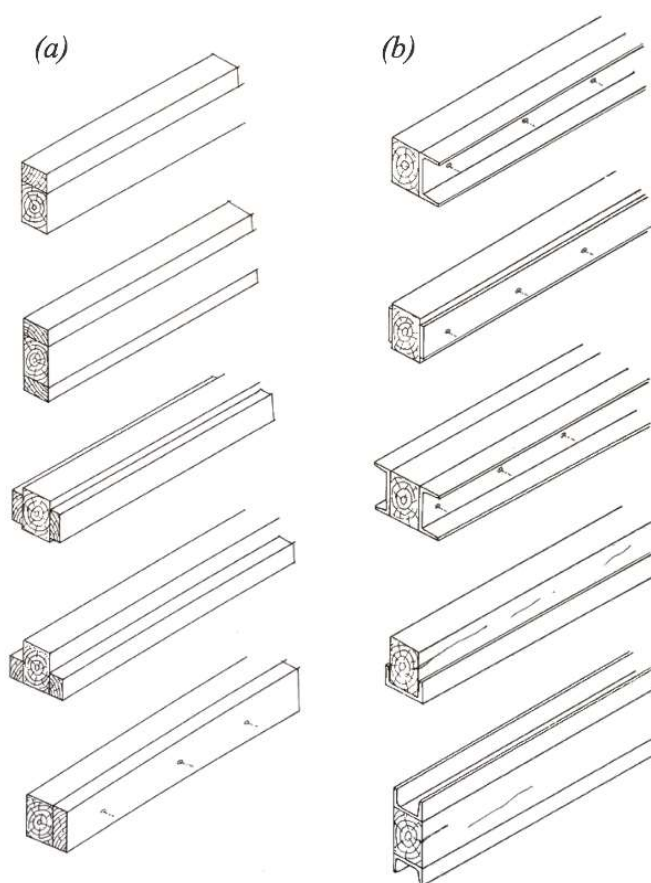
Správný návrh zpevňujícího prostředku je založen na základě statického výpočtu. Základní požadované informace při návrhu jsou znalost statické funkce prvku a způsoby jeho namáhání v tlaku, tahu, ohybu, smyku, na otláčení a na vzpěr. Specifickým typem ztužení je tzv. nepřímé zpevňování, např. ztužení, podepření nebo vyvěšení.(8)

Zpevňování se uplatňuje při opravách různých typů konstrukcí. V případě konstrukce s historickou, uměleckou nebo kulturní cenou je nutné citlivě vybrat takový typ sanace, aby byla zachována původnost a památková hodnota.(8)

3.2.1 Příložkové a výškové nastavování

Příložkování dřevěných prvků se provádí vnějšími příložkami ze dřeva, z oceli nebo z uhlíkových vláken. Příložku můžeme umístit z jedné strany nebo i z více stran. Strana se určuje dle převládajícího zatížení, např. trám namáhaný na ohyb by měl být příložkováný ve směru ohybu. Bohužel tento postup není možné vždy využít z konstrukčních důvodů, např. u stropu. Zesilování se provádí po celé délce prvku nebo pouze lokálně.(8)

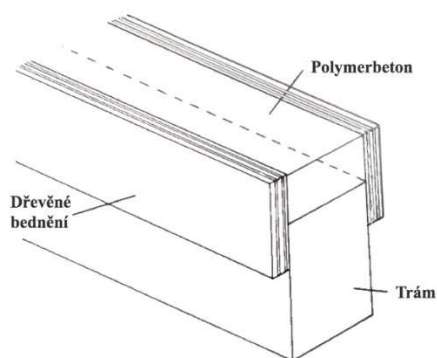
Ke spojení dřevěných příložek dřevěným prvkem (Obr. 16) se většinou využívají hřebíky a šrouby se šestihrannou hlavou do dřeva, u širších příložek pak svorníky. Při zvláštních situacích lze využít i jiné spojovací prvky, jako jsou hmoždíky, styčnickový plech s oboustranně prolisovanými trny nebo kolíky.(8)



Obr. 16 Příložkování dřevěných prvků pomocí příložek: (a) dřevěných, (b) ocelových (8)

Spojení pomocí ocelových příložek (Obr. 16) se provádí v zásadě pomocí svorníků o průměrech 12, 16, 20 mm. Ocelové příložky dokáží přenášet větší zatížení než dřevěné a nehrozí jim napadení houbami či hmyzem, ale mohou být poškozeny korozí. Proto jsou opatřovány protikorozními nátěry, nebo jsou vyrobeny z nerezové oceli.(8)

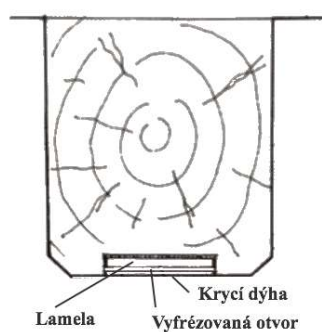
Výškové nastavení dřevěných prvků se provádí pomocí polymerbetonu¹, kdy se trám nejprve ohradí dřevěným bedněním do požadované výšky a následně se vyplní polymerbetonovou mazaninou, viz (Obr. 17). (8)



Obr. 17 Výškové nastavení stropního trámu vrstvou polymerbetonu (8)

3.2.2 Aplikace uhlíkových vláken

Lamely z uhlíkových vláken jsou moderním způsobem zpevnění dřevěných prvků. Mají vysokou pevnost v tahu a vysoký modul pružnosti. Díky této vlastnosti jsou tyto lamely vhodné pro použití při opravách dřevěných konstrukcí. Využívá se vysoká pevnost při malé tloušťce lamely, díky které mohou být do trámu zafrézovány a následně zakryty dýhou o stejné barvě a textuře jako dřevěný prvek (Obr. 18). Je vhodné je umístit do tlačené i tažené části dřevěného prvku.(8)



Obr. 18 Aplikace uhlíkových vláken do trámu (8)

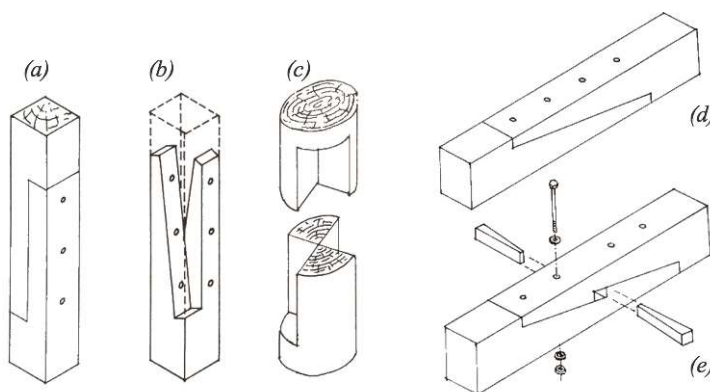
3.2.3 Protézování

Při protézování dřevěného prvku dochází k náhradě degradované části nebo k prodloužení prvku novou částí tzv. protézou. Tvarově je protéza stejná jako původní prvek, tudíž průřez prvku zůstává

¹ **Polymerbeton** – syntetický polymer s přídavkem plniva

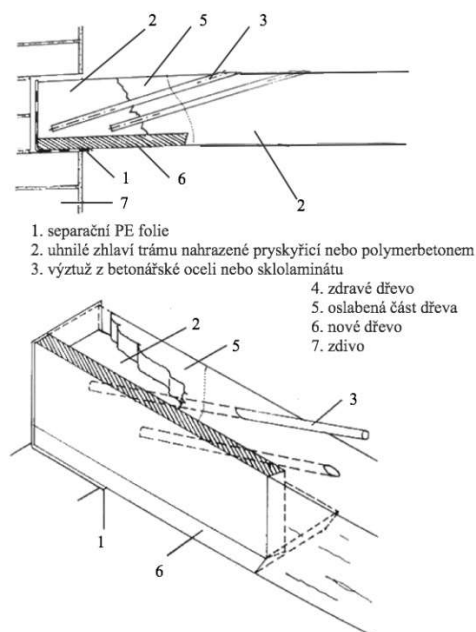
zachovaný. Materiál původního prvku většinou zůstává zachovaný, ale není to nutnost. Při protézování lze použít i jiné materiály, než je dřevo, např. polymerbeton.(8)

Protézování se používá dvojího typu. První typ tzv. klasické protézování je spojení zbytkové části degradovaného prvku s novým dřevěným prvkem pomocí tesařských spojů, viz (Obr. 19). Tento druh spoje často splní i ty nejnáročnější architektonické požadavky. Nejčastěji se používají rovné nebo šikmé plátované spoje. Délka spoje u použití dvou svorníků by neměla být menší než 600 mm. Při plátování prvků namáhaných na ohyb a tah je vhodné použít hmoždíky.(8)



Obr. 19 Tesařské spoje: (a) rovný plátový spoj, (b) nůžkový plátový spoj, (c) křížový plátový spoj, (d) šikmý plátový spoj, (e) zaklínovaný šikmý plátový spoj (8)

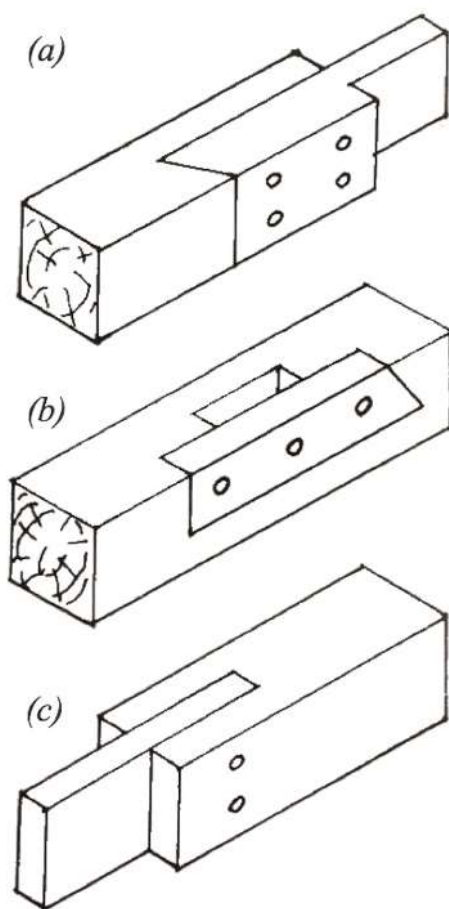
Druhý typ spoje je protézování beta metodou. V dnešní době je hojně užíván při opravě dřevěných prvků s vysokou památkovou hodnotou. Dřevěný prvek je vyztužen pomocí betonářské profilované výztuže, sklolaminátu nebo uhlíku, přičemž degradovaná část je nahrazena epoxidovou pryskyřicí nebo polymerbetonem, viz (Obr. 20). Výsledkem je dokonalé spojení dřeva a výztužného prutu s výplňovým syntetickým polymerem.(8)



Obr. 20 Beta metoda protézování (8)

3.2.4 Plombování

Při plombování se doplní nebo vymění část poškozeného dřevěného prvku. Plombováním získáme opětovně celistvý konstrukční prvek. Tato oprava je i vhodná pro obnovu pevnosti, ale pouze v tlaku. Dřevěné plomby se vsazují do dutin, trhlin nebo spár, které vznikly během užívání a stárnutí dřevěné konstrukce. Při plombování se nejprve musí odstranit staré degradované dřevo. Poté se plomba připevní pomocí lepidla nebo jiného spojovacího prostředku (Obr. 21). Jako plomba se většinou využívá stejný druh dřeva, u kterého je důležité zachovat orientaci vláken a stejnou šířku ročních kruhů. Je vhodné užít podobně staré dřevo pro zachování přibližně stejných vlastností náhrady a původního prvku. Kromě dřeva může sloužit i jiný materiál, např. tmely nebo tuhé pěny.(8)



Obr. 21 Dřevěné plomby používané při opravě tesařských spojů: (a) zasunutý čep, (b) lokální plomba u dlabu, (c) plomba s funkcí čepu (8)

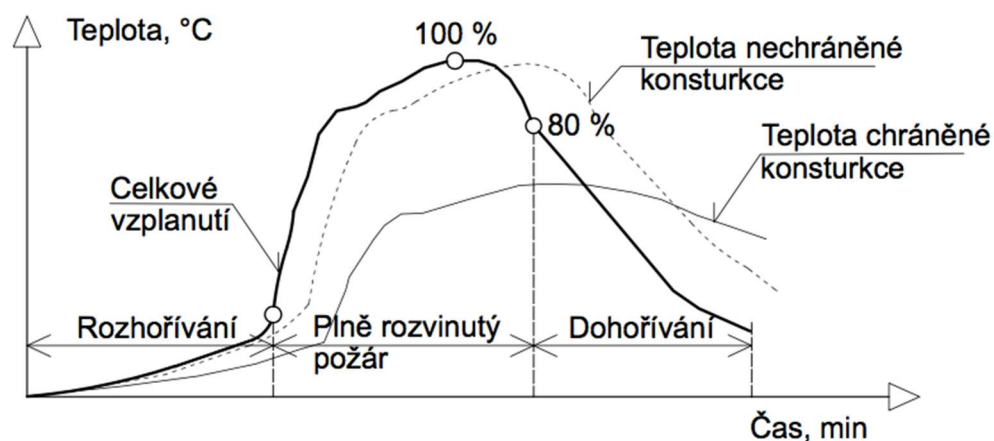
4 Chování dřevěných a ocelových konstrukcí za požáru

4.1 Požární odolnost

Požár v budovách vzniká a rozvíjí se dle míry uvolňování energie hoření a dle charakteru PÚ. Množství uvolněné energie požáru závisí zpravidla na třech podnětech, které ovlivňují průběh hoření. Na množství a typu paliva, vlastnostech okolních konstrukcí a na podmínkách ventilace v daném PÚ.(9)

Průběh požáru se zpravidla rozděluje do tří fází (Graf 1):

- *rozhořívání*, kde dochází k iniciaci požáru a pomalému zvyšování teploty v PÚ. V této fázi požáru jsou teploty v PÚ nízké a nehrozí velké poškození konstrukcí. Je zde snadné lokalizovat požár a zajistit bezpečnou evakuaci. Při této fázi je většinou možné požár účinně uhasit, a to až do bodu celkového vzplanutí;
- *plně rozvinutý požár*, kde dochází ke vzplanutí celého prostoru. Teplota v PÚ rychle vzroste do maximálních hodnot, dochází k poškození konstrukcí a požár se může rozšířit i do dalších PÚ. Plameny zahalují celý prostor PÚ. V této fázi už evakuace není příliš úspěšná a v prostoru zasaženém požárem není velká šance na přežití osob;
- *dohořívání* je stav, který začíná od poklesu teplot na cca 80 % až do celkového vyhasnutí požáru. Tento stav je pro návrh konstrukce také důležitý, jelikož teplota konstrukcí i při chladnutí plynů roste (Graf 1).(9)



Graf 1 Fáze rozvoje požáru (9)

Obor zabývající se požární odolností konstrukcí se jmenuje požární bezpečnost staveb. Má dvě základní složky. Požární prevenci, zabývající se předcházením požáru a omezení následků

požáru. Požární represi, která je zaměřená na zdolávání požáru. Hlavním úkolem požární prevence při požáru je zachování nosné funkce konstrukce, omezení rozvoje a šíření ohně a kouře v objektu, zamezení rozšíření požáru na další budovy, zajištění bezpečné evakuace z budovy a umožnění účinného a bezpečného zásahu požárních jednotek. Zachování nosné funkce konstrukce se posuzuje tzv. požární odolností konstrukce.(9)

Požární odolnost stavební konstrukce je schopnost jednotlivých konstrukčních prvků odolávat požáru a tím zachovat nosnou funkci konstrukce jako celku. Hodnota požární odolnosti se vyjadřuje v minutách, po kterých konstrukce zajišťuje svou funkci.(9)

Rozděluje základní čtyři typy mezních stavů požární odolnosti:

- *únosnost*, značenou (R). Hodnota udávající dobu, po kterou konstrukce zachovává svou nosnou funkci. Lze výpočtem ověřit;
- *celistvost*, značenou (E). Hodnota udávající dobu, po kterou konstrukce zachovává svojí požárně dělicí funkci. Tuto hodnotu nelze výpočtem ověřit;
- *tepelná izolace*, značená (I). Hodnota udávající dobu, po kterou konstrukce zachovává svojí požárně dělicí funkci, aniž by teploty na neohřívané straně konstrukce způsobily zvýšení průměrné teploty nad počáteční průměrnou teplotu o více než 140 °C nebo vzrůst teploty v kterémkoli místě nad počáteční průměrnou teplotu o více než 180 °C. Tepelná izolace se dá prokázat výpočtem prostupu a vedením tepla konstrukcí;
- *radiace*, značená (W). Hodnota udávající dobu, po kterou je konstrukce schopna odolávat požáru z jedné strany natolik, že se sníží pravděpodobnost vzniku rozšíření požáru následkem sálavého tepla působícího na sousední konstrukce nebo na unikající osoby. Přípustná radiace ozáření osob je 10 kW/m² po dobu 5 s.(9)

V rámci požární bezpečnosti staveb máme ještě další specifické mezní stavy, které se vážou k otvorům v konstrukcích. Jsou jimi kouřotěsnost, značená (S), a samozavírací schopnost, značená (C).

4.2 Výpočetní metody požární odolnosti

Klasifikace konstrukcí se vyznačuje mezními stavy a dobou, po kterou je konstrukce schopná tento stav zachovat (viz kapitola 4.1). Jestliže například konstrukce splňuje mezní stav únosnosti po dobu t , značí se tento stav $R(t)$, kde čas t je dán v minutách. Stejně tak se vyznačují ostatní mezní stavy. Ověření těchto hodnot t se provádí pomocí několika výpočetních postupů.(9)

Návrhové postupy lze rozdělit do několika obtížností a přesností výpočtu. Nejpresněji můžeme teplotu při požáru určit dynamickou analýzou plynů metodou konečných prvků. Jednodušeji lze teplotu plynu při požáru předpovědět pomocí parametrických teplotních křivek nebo jednodušších nominálních teplotních křivek. Požární odolnost stanovená nominální normovou teplotní křivkou se nazývá normová požární odolnost.(9)

Přestup tepla do konstrukce a její rozvoj lze analyzovat metodou konečných prvků a přírůstkovou metodou. Pro zjednodušení výpočtů byly vypracovány tabulky a pomůcky, které lze najít v příslušných normách. K řešení se dnes hojně využívají univerzální komerční programy s nástavbami, např. ANSYS, ABAQUS, ATENA, nebo specializované programy, jako jsou OZONE, FDS atd.(9)

Základní teplotní analýzy pro návrh požární odolnosti jsou zpracovány v evropských normativních předpisech. Přestup tepla a rozvoj teploty v konstrukcích a vlastní posouzení na účinky požáru jsou stanoveny v normách jednotlivých materiálů jako část 2, např. pro ocelové konstrukce (EN 1993-1-2: 2004) nebo pro dřevěné konstrukce (EN 1995-1-2: 2004).(9)

Ověření požární odolnosti se provádí dle času

$$t_{fi,d} \geq t_{fi,requ} \quad (4.1)$$

kde $t_{fi,d}$ je návrhová doba požární odolnosti a $t_{fi,requ}$ je požadovaná doba požární odolnosti; dle únosnosti

$$R_{fi,d} \geq E_{fi,d,t} \quad (4.2)$$

kde $R_{fi,d}$ je návrhová únosnost konstrukce při požáru v čase t , $E_{fi,d,t}$ je návrhová hodnota účinků zatížení při požáru v čase t ; dle teploty

$$Q_d \leq Q_{cr,d} \quad (4.3)$$

kde Q_d je návrhová teplota materiálu a $Q_{cr,d}$ je návrhová hodnota kritické teploty materiálu. Zdali při výpočtu zvolíme dané hledisko požární odolnosti nemá na přesnost výpočtu vliv. Při návrhu je však výhodné brát zřetel na hledisko času, jelikož nám přímo udává spolehlivost při požární odolnosti konstrukce.(9)

Z návrhové únosnosti při pokojové teplotě R_d lze vypočítat únosnost konstrukce při požáru $R_{fi,d,t}$ v čase t užitím redukčního součinitele $\eta_{fi,t}$, který je závislý na čase t a je uveden v normách (EN 1993-1-2: 2004 pro ocel, EN 1995-1-2: 2004 pro dřevo).(9)

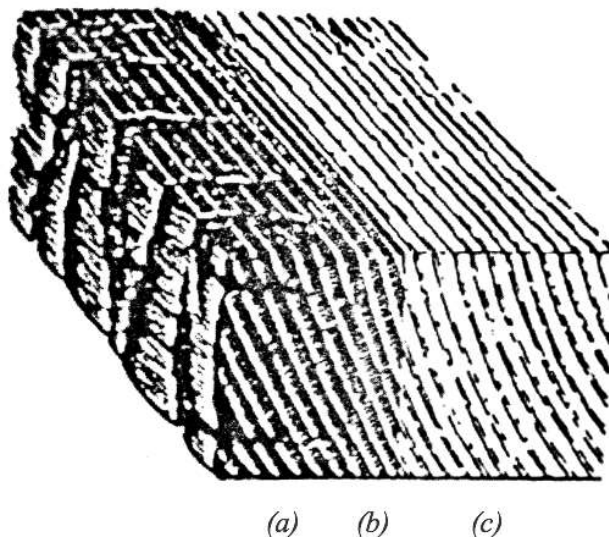
$$R_{fi,d,t} = \eta_{fi,t} R_d \quad (4.4)$$

Požární odolnost lze také stanovit zkouškou. Při zkoušce se dle zkušebních norem materiál vystaví účinkům teplot dle nominální normové křivky. Oproti výpočetním postupům jsou požární zkoušky ekonomicky i časově náročnější. Zkoušky budou vždy v rámci určování požární odolnosti nejhodnotnějšími metodami, jelikož zahrnují i další faktory při požáru, které mohou ovlivnit mezní stavy, např. celistvost konstrukce, časový průběh tvorby trhlin apod.(9)

4.3 Chování dřevěných konstrukcí za požáru

Chování dřevěných materiálů není možné jednoduše popsat. Materiály na bázi dřeva jsou hořlavé, avšak tuto vlastnost lze redukovat povrchovou úpravou nebo impregnací, kdy je nutná větší energie pro jejich zapálení. Rostlé dřevo je obtížně zápalné a teplota, která je potřebná k samovznícení je více než 400 °C. Dokonce i v přítomnosti zápalného zdroje musí být povrchová teplota větší než 300 °C. Dřevo se v požární bezpečnosti staveb používá jako srovnávací materiál pro zařazení ostatních materiálů, jelikož vykazuje přijatelné riziko zapálení.⁽⁶⁾

Je-li dřevo vystaveno plně rozvinutému požáru s dostatečně velkým tepelným tokem, jeho povrch se zapálí a rychle hoří. Následně se však vytvoří zuhelnatělá vrstva, která slouží jako tepelný izolant (Obr. 22). Pod touto vrstvou se nachází vrstva pyrolýzy² s teplotou nad 200 °C, která je při požáru větším než 20 minut široká 30 mm.⁽⁶⁾



Obr. 22 Změna dřeva za požáru: (a) vrstva zuhelnatělého dřeva, (b) vrstva pyrolýzy, (c) vrstva tepelně nezměněného dřeva (6)

Jak se dřevěný prvek bude chovat při požáru, je silně ovlivněno tvarem, povrchem a rozměry průřezu. Hořlavost je závislá na poměru mezi povrchem a objemem dřevěného prvku. Čím větší je tento poměr, tím rychleji se šíří plamen. To znamená, že příliš hrubý povrch prvku bude přispívat k větší hořlavosti. Je tedy výhodné prvky obrousit a zaoblit hrany. Z toho vyplývá, že lepené lamelové dřevo vykazuje menší míru zuhelnatění, jelikož je bez trhlin a s hladkými povrchy.⁽⁶⁾

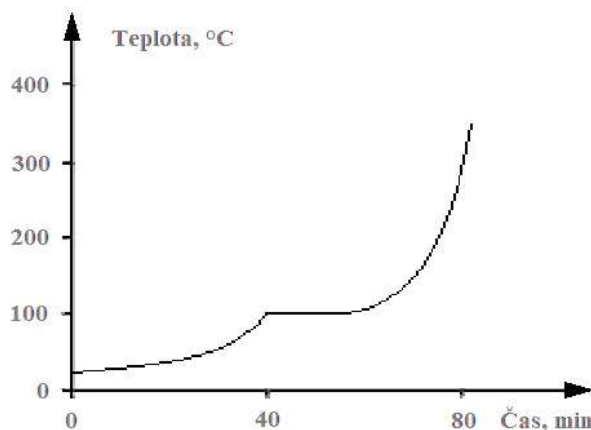
Změny v dřevu při požáru lze zjednodušeně popsat v několika bodech:

- v rozmezí 150 až 200 °C se tvoří povrchové plyny (cca. 70 % nehořlavého CO₂ a 30 % hořlavého CO;
- < 275 °C probíhá již zmiňovaná pyrolýza (tepelný rozklad dřeva);

² **pyrolýza** – tepelný rozklad, kdy dochází k uvolňování plynů a ztrátě hmotnosti v případě dřeva

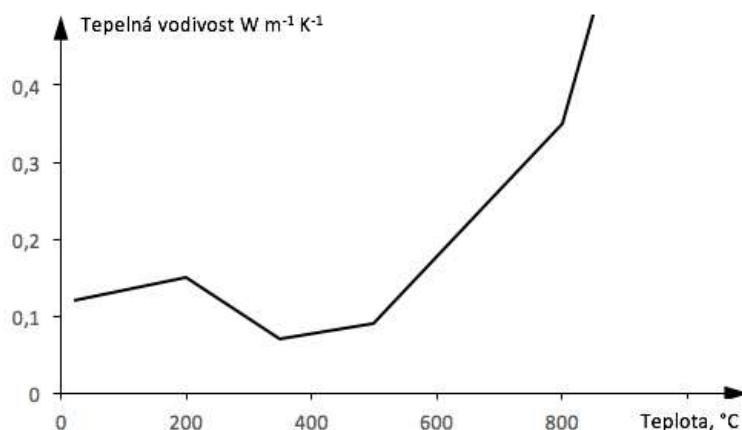
- $> 275\text{ }^{\circ}\text{C}$ rychlý nárůst teploty tvorbou snadno zápalných směsí uhlovodíků o výhřevnosti $8\,374\text{ kJ/m}^3$;
- $400\text{ až }420\text{ }^{\circ}\text{C}$ vznik nejvíce hořlavých směsí s výhřevností až $18\,840\text{ kJ/m}^3$;
- $> 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ tvoření hořlavých směsí se snižuje. (9)

Vývoj teploty dřeva při zasažení požárem s nominální normovou teplotní křivkou vystihuje graf (Graf 2), kde lze vidět, že při teplotách do $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ se pomalu vysušuje dřevo a pomalu roste teplota. V teplotách nad $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ se začíná odpařovat voda ve dřevě a pára uniká cestou nejmenšího odporu. Teplota zůstává konstantní až do doby, nežli se voda odpaří a následně prudce stoupne. (9)



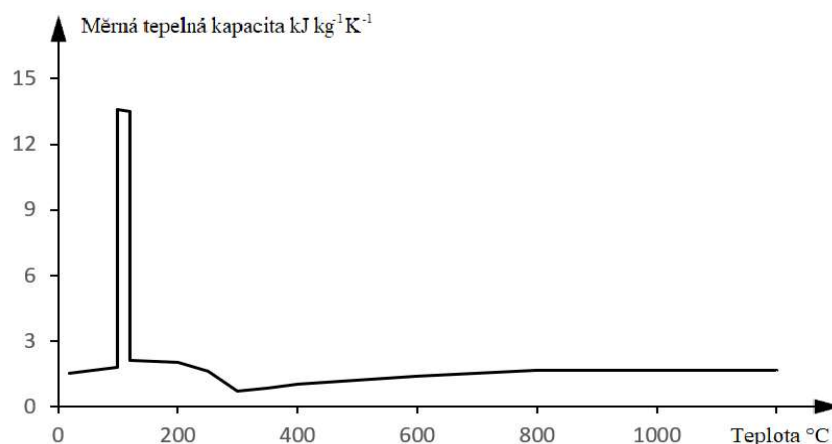
Graf 2 Teplota pod vrstvou pyrolýzy dřeva při nominálním normovém požáru (9)

Tepelná vodivost dřeva se při zvýšené teplotě mění. Její vývoj vystihuje následující graf (Graf 3). Z grafu je patrné, že při teplotách kolem $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ dochází k zuhelnatění dřeva, jelikož je tepelná vodivost λ na nejnižší hodnotě a jak bylo řečeno, zuhelnatělá vrstva slouží jako tepelný izolant. Požární odolnost dřevěných konstrukcí je tedy podstatně vyšší, než se předpokládá.



Graf 3 Vývoj tepelné vodivosti dřeva v závislosti na teplotě (10)

Měrná tepelná kapacita oceli se v závislosti na teplotě taktéž mění. Funkci tohoto průběhu v závislosti na teplotě charakterizuje graf (Graf 4).



Graf 4 Vývoj měrné tepelné kapacity dřeva v závislosti na teplotě (10)

4.3.1 Hloubka zuhelnatění dřeva

Pomocí požárních zkoušek dřeva materiálu na bázi dřeva se určila závislost mezi zuhelnatěním a dobou požáru. Pro výpočet požární odolnosti dřevěného prvku lze zjednodušeně počítat se stálou rychlostí zuhelnatění β_0 dle tabulky (Tab. 1). Zbytkový průřez pro návrh za požáru se dle nominální normové křivky posuzuje, jako

$$d_{char} = \beta_0 \cdot t \quad (4.5)$$

kde β_0 je rychlost zuhelnatění uvedena v tabulce (Tab. 1) a t doba vystavení požáru v minutách. (6)

Tab. 1 Rychlost zuhelnatění β_0 pro dřevo (10)

| Druh dřeva | β_0 [mm/min] |
|--|--------------------|
| Rostlé dřevo s charakteristickou hustotou $\geq 290 \text{ kg/m}^3$ a nejmenším rozměrem 35 mm | 0,8 |
| Lepené lamelové dřevo s charakteristickou hustotou $\geq 290 \text{ kg/m}^3$ | 0,7 |

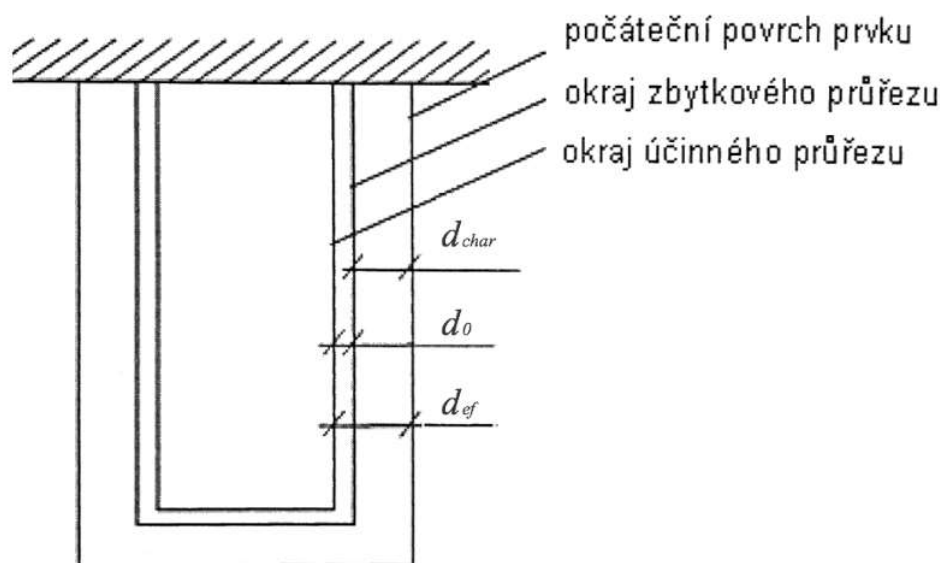
Zuhelnatění dřeva je nutné zvažovat pro všechny povrchy dřeva vystavené požáru kromě částí, které jsou chráněny pláštěm požární ochrany. (6)

4.3.2 Návrh redukovaného průřezu prvku

Účinný průřez prvku za požáru se určí zmenšením původního průřez o hloubku zuhelnatění (Obr. 23).

$$d_{ef} = d_{char} + k_0 \cdot d_0 \quad (4.6)$$

Kde d_0 je vrstva s nulovou pevností dřeva. U požáru delšího než 20 minut je $d_0 = 7$ mm; d_{char} je hloubka zuhelnatělé vrstvy (viz kapitola 4.3.1) a k_0 součinitel upravující tloušťku vrstvy nulové pevnosti v závislosti na délce požáru.(6)



Obr. 23 Zbytkový a účinný průřez (6)

4.4 Chování ocelových konstrukcí za požáru

Navrhování ocelových konstrukcí na zvýšené teploty je závislé na její konstrukční celistvosti při požáru. Největší nevýhodou oceli je její velice vysoký tepelná vodivost, která je několikasetnásobně vyšší než tepelná vodivost dřeva. Vlastnosti oceli se již při teplotě nad 400 °C redukuje stejně jako ostatní stavební materiály (beton, dřevo apod.).(9)

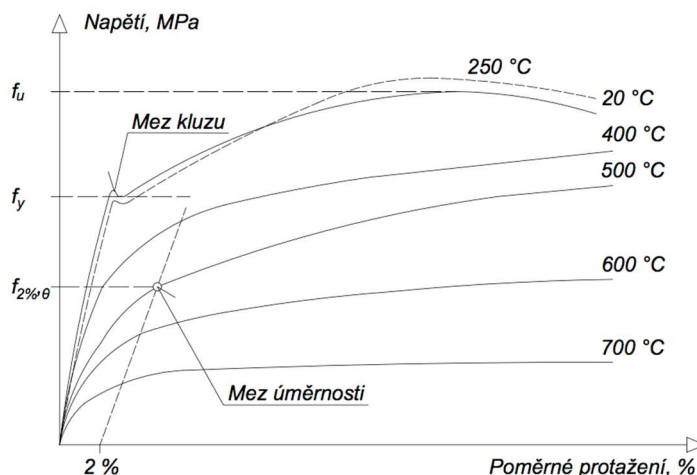
Z důvodu těchto nepříliš dobrých požárních vlastností oceli se v praxi navrhují požární ochranné materiály, které izolují ocel od požáru. Nejčastěji jsou jimi obetonování nebo využití ocelobetonových konstrukcí, obklady požárně odolnými deskami, nástřiky a dnes velmi hojně užívanými zpěňujícími nátěry.(9)

4.4.1 Mechanické vlastnosti oceli při požáru

Deformace oceli při požáru je ovlivněna teplotou, velikostí působícího zatížení a tečením v čase. Předpokladem je, že pro výpočet se jednotlivé složky poměrného protažení popíší samostatně, jak je uvedeno v rovnici 4.7

$$\Delta \varepsilon = \varepsilon - \varepsilon_i = \varepsilon_{\sigma} f(\sigma; \theta) + \varepsilon_{\theta} f(\theta) + \varepsilon_{cr} f(\sigma; \theta; t) \quad (4.7)$$

kde ε je poměrné protažení v čase t , ε_i počáteční protažení v čase $t = 0$, ε_{σ} deformace od mechanického namáhání závislé na napětí σ a na teplotě θ , ε_{θ} je teplotní protažení závislé na teplotě θ a ε_{cr} je část od tečení oceli v čase závislé na teplotě θ , na napětí σ a na čase.(9)

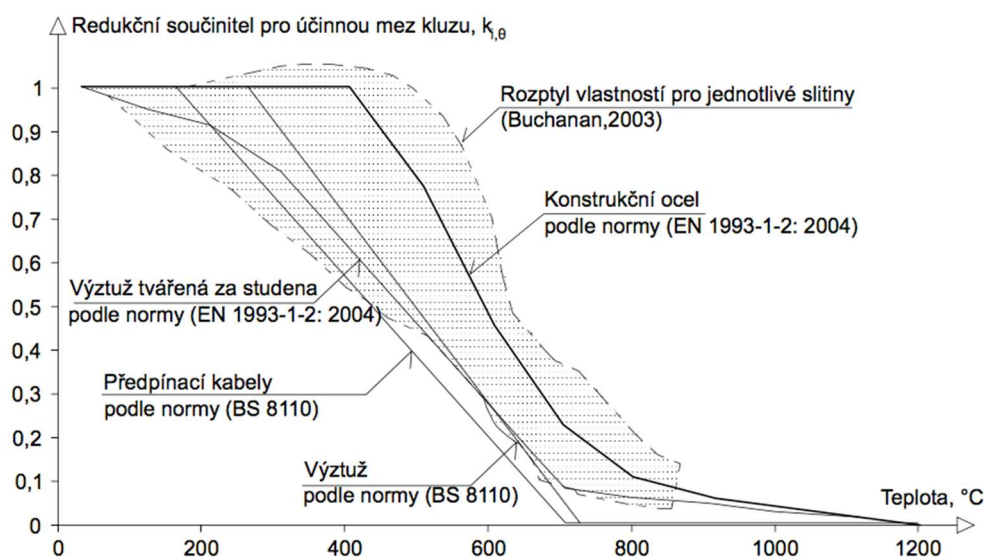


Graf 5 Mez úměrnosti pro oceli při zvýšených teplotách (9)

Mez kluzu se zvyšující se teplotou klesá, jak je vidět z grafu (Graf 5). Mez pevnosti se však při zvýšené teplotě mírně zvýší a okolo 250 °C dosáhne své nejvyšší hodnoty. Při teplotě nad 350 °C klesne na svou původní hodnotu a při dalším zvýšení teplot už pouze klesá. U oceli s teplotou nad 400 °C už mez kluzu přestává být patrná a pro návrh se používá mez úměrnosti, která se nazývá účinnou mezí kluzu. Tato mez se liší pro různé typy slitiny a teploty. Pro návrh se v praxi účinná mez kluzu uvažuje jako mez úměrnosti při 2 % změny poměrné deformace.(9)

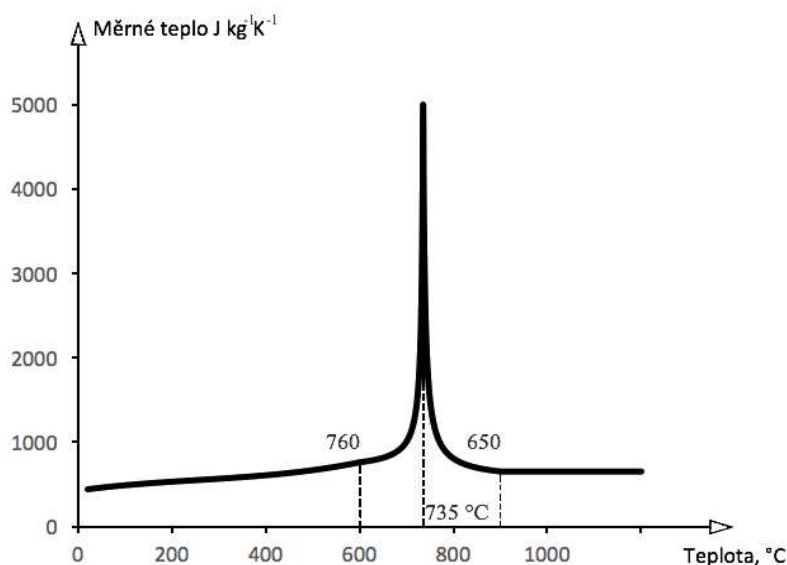
Tepelná roztažnost oceli je při zvýšených teplotách výrazná, např. při ohřevu o 400 °C se 10 metrů dlouhý nosník prodlouží o 50 mm.(9)

Ocel je slitina, a tudíž její vlastnosti za zvýšených teplot jsou rozdílné dle obsahu uhlíku a legujících příměsí, což je zobrazeno v grafu (Graf 6). Pro zjednodušené výpočty jsou mechanické vlastnosti oceli při zvýšené teplotě udávány redukčními součiniteli, které stanovujeme při 20 °C dle EN 1993-1-2: 2004.(9)

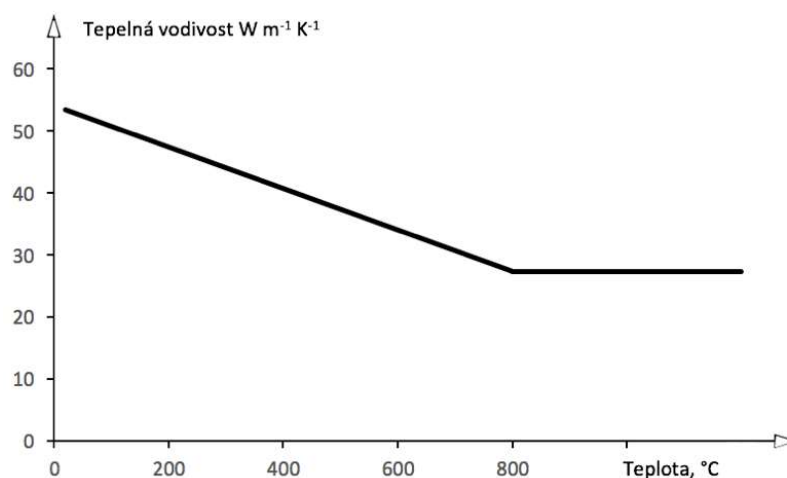


Graf 6 Rozptýl meze kluzu oceli (9)

Materiálové vlastnosti, které mají vliv na změnu teploty v ocelové konstrukci jsou měrná tepelná kapacita, měrné teplo (Graf 7) a tepelná vodivost (Graf 8). Hustota oceli při požáru se předpokládá konstantní a to $\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$.(9)



Graf 7 Závislost měrného tepla uhlíkové oceli na teplotě (9)



Graf 8 Závislost tepelné vodivosti na teplotě (9)

Výpočet nárůstu tepla v ocelové konstrukci od požáru se obecně řeší integrací diferenciální rovnice vedení tepla. Složka čistého sálavého tepelného toku na jednotku plochy se stanoví pro polohový faktor Φ , emisivitu ε a teplotu okolí prvku θ_r . Rozvoj teploty v okolí prvku při požáru se uvažuje dle nominální normové nebo parametrické teplotní křivky, či pomocí dynamické analýzy plynů. Rovnice se řeší numericky, ale k dispozici jsou i výpočtové softwary.(9)

Výpočty se dají provádět zjednodušeně s uvažováním pouze jednorozměrného vedení tepla a využitím vysoké tepelné vodivosti oceli. Výpočet rozložení tepla v oceli lze počítat pomocí tzv. přírůstkové metody, dle vztahu (4.8).(9)

$$h_{net} \cdot A_m \cdot \Delta t = \rho_a \cdot c_a \cdot V \cdot \Delta \theta_a \quad (4.8)$$

kde h_{net} je čistý tepelný tok na plochu v W/m^2 , A_m je povrch prvku, ρ_a hustota oceli, c_a měrné teplo oceli a V je objem prvku na jednotku délky. Tuto rovnici lze upravit do následujícího tvaru (4.9).

$$\Delta \theta_a = \left(\frac{A_m}{V} \right) \cdot \left(\frac{1}{\rho_a \cdot c_a} \right) h_{net} \cdot \Delta t \quad (4.9)$$

kde je vidět, že vzrůst teploty je závislý na součiniteli průřezu (A_m/V) v m^{-1} . Součinitelé průřezů jsou dány v normě EN 1993-1-2: 2004. Čistý tepelný tok na plochu se vypočte dle rovnice (4.10).

$$h_{net} = \alpha_c \cdot (\theta_g - \theta_m) + \Phi \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot \left[(\theta_g + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4 \right] \quad (4.10)$$

Řešení rovnice (4.8) po krocích popisuje rozvoj teploty v ocelové konstrukci. Postup lze nalézt v normě EN 1993-1-2: 2004 pro přírůstky menší než 5 s, pro výpočet využívá tvaru (4.11).

$$\Delta \theta_a = k_{sh} \cdot \frac{A_m/V}{\rho_a \cdot c_a} \cdot h_{net,d} \cdot \Delta t \quad (4.11)$$

kde k_{sh} je součinitel zastínění, který se vypočte dle vztahu (rovnice).

$$k_{sh} = \{0,9\} \frac{(A_m/V)_b}{(A_m/V)} \quad (4.12)$$

kde $\{0,9\}$ se započítává pouze u průřezů typu I.(9)

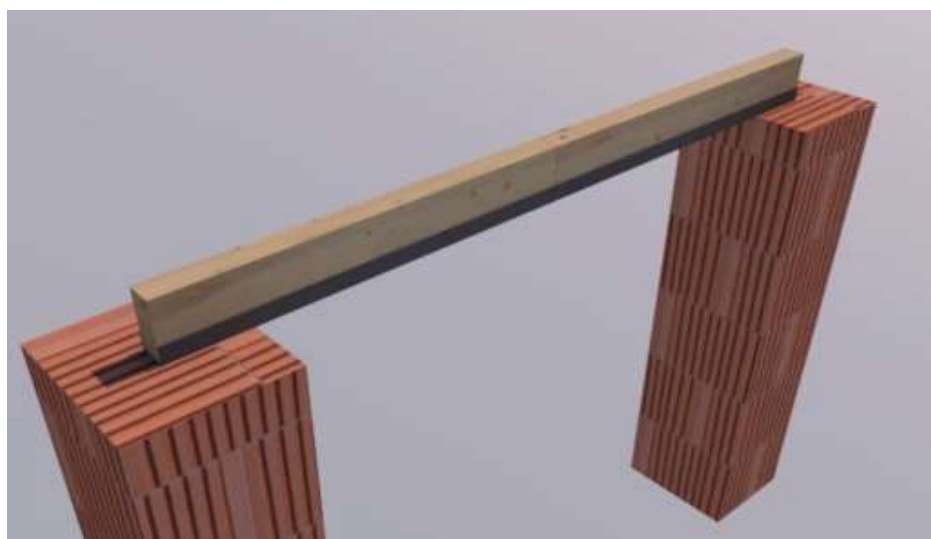
5 Velkorozměrová požární zkouška

V rámci vypsaní grantu univerzitou ČVUT v Praze proběhla 20. září 2017 velkorozměrová požární zkouška ve slaměném objektu v areálu UCEEB v Buštěhradu. Na tomto projektu se podílelo několik studentů, kteří testovali jak vlastnosti slaměného objektu na požární odolnost, tak samostatné prvky požární ochrany nezávisle na konstrukci domu.

Touto prací zpracovávanou na katedře dřevěných konstrukcí pod vedením Ing. Lukáše Blesáka, Ph.D. bylo posouzení spojů dřevěných konstrukcí na účinky požáru. Pro toto posouzení byly vybrány dva typy spojů, které byly umístěny do prostoru s požárem. Oba spoje byly řešeny na dřevěných trámech o průřezu 120 x 160 mm a délky 2 500 mm. Trámy byly ve vzdálenosti 1250 mm přetnuty a následně spojeny daným spojovacím prostředkem. První spoj byl proveden jako nechráněný s vnějšími ocelovými příložkami (Obr. 24). Další spoj, který byl posuzován v experimentu, je nechráněný, pomocí dvou ocelových L profilů přilepených ke dřevěnému trámu (Obr. 25).



Obr. 24 *Nechráněný spoj pomocí vnějších ocelových příložek*



Obr. 25 *Nechráněný spoj pomocí vnějších ocelových „L“ profilů*

5.1 Výstavba experimentálního objektu

Stavba experimentálního objektu započala v sobotu 11. března 2017 na pozemku UCCEB v Buštěhradu. Na stavbě se podílelo několik kateder v čele s katedrou konstrukcí pozemních staveb. Technologie výstavby slaměného experimentálního objektu není předmětem této práce, a proto je to tu pouze velice stručně uvedeno.

Nejprve bylo nutné stanovit místo, kde se bude experimentální budova nacházet. K tomuto účelu posloužila panelová cesta na západní straně několik metrů od oplocení pozemku areálu UCCEB. Důkladně jsme tuto panelovou komunikaci očistili a na ní vystavěli základové patky, které se skládaly z betonových tvárnic (Obr. 26). Betonové tvárnice se následně vylily připraveným betonem. K propojení patky s panelem sloužily závitové tyče, které byly z poloviny vlepeny do vyvrtaných otvorů v panelu a z druhé poloviny zabetonovány v betonové tvárnici.



Obr. 26 Příprava betonových základových patek

Následně bylo nutné připravit a namontovat dřevěný ztužující věnec, který se propojil se základovými patkami. Tento věnec se skládal ze dvou OSB desek spojených skrze dřevěné latě (Obr. 27). Takto vystavěný věnec slouží jako startovací prvek pro skladbu slaměných bloků (Obr. 28).



Obr. 27 Schéma konstrukce dřevěného věnce



Obr. 28 *Namontovaný dřevěný věnec na betonové patky*

Ještě před samotnou montáží slaměných bloků bylo potřeba připravit dveřní a okenní otvory obdobnou technologií jako byl proveden dřevěný věnec. Rozdíllem bylo použití pouze jedné OSB desky ve vertikálním ostění. U překladu zůstala konstrukce stejná jako u věnce, viz (Obr. 29).



Obr. 29 *Dveřní otvory ukotvené do věnce*

Po této konstrukci začala skladba slaměných bloků. Slaměné bloky o velikosti 800 x 400 x 370 mm se skládají na vazbu obdobným způsobem jako skládání cihelných tvárnic. Po vystavění zdi je potřeba ukotvit horní dřevěný ztužující věnec a dostatečně celou stěnu od spodního po horní věnec stáhnout ocelovými páskami, viz (Obr. 30).



Obr. 30 Vystavěné slaměné bloky

Jako poslední fáze výstavby před prováděním omítek bylo zapotřebí zkonstruovat zastřešení slaměného objektu. Střecha byla postavena jako pultová s dřevěnými krokviemi a se záklopem z OSB desek (Obr. 31). Krytina byla provedena z asfaltových hydroizolačních pásů. Podhled byl zaklopen také OSB deskami a mezi krokve byla instalována čedičová a skelná tepelně-izolační vata.



Obr. 31 Výstavba střechy

Po dokončení střechy byly dokončeny omítky. Část objektu byla omítnuta hliněnou omítkou a část vápennou. Nakonec se vsadily okenní a dveřní výplně a objekt byl dostavěn.

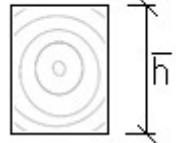
5.2 Provedení velkorozměrové požární zkoušky

Dne 20. září 2017 se uskutečnila v Buštěhradě velkorozměrová požární zkouška. V rámci této práce byly testovány dva spoje dřevěných konstrukcí. První spoj pomocí dvou ocelových přílozek spojených skrze dřevěný trám ocelovými svorníky (Obr. 24). Druhý pomocí dvou L-profilů přilepených k dřevěnému trámu (Obr. 25). Tyto spoje byly testovány vždy na dvou samostatných experimentálních trámech.

5.2.1 Příprava experimentálních trámů

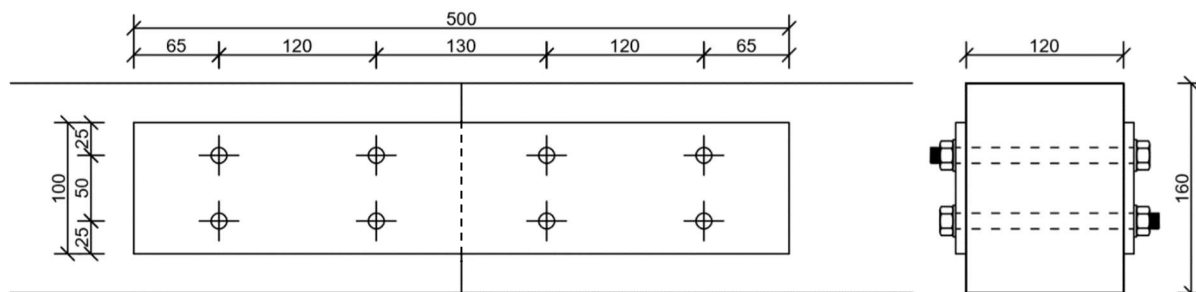
Byly zakoupeny čtyři kusy trámu o délce 2 500 mm a o rozměru průřezu 160 x 120 mm. Následně byly trámy zváženy a změřeny pro zjištění vlastností trámů. Změřené hodnoty jsou zaznamenány v tabulce (Tab. 2). Tyto hodnoty byly dále použity jako vstupní data do výpočtů.

Tab. 2 Změřené charakteristiky dřeva

| č. | m [kg] | l [mm] | \bar{d} [mm] | \bar{h} [mm] | V [m ³] | ρ_d [kg/m ³] | |
|----|--------|--------|----------------|----------------|---------------------|-------------------------------|--|
| 1 | 22,3 | 2577,0 | 117,5 | 157,5 | 0,0477 | 467,6 |  |
| 2 | 22,8 | 2578,0 | 116,5 | 157,0 | 0,0472 | 483,5 | |
| 3 | 22,0 | 2545,0 | 116,5 | 156,0 | 0,0463 | 475,6 | |
| 4 | 22,4 | 2538,0 | 118,0 | 156,0 | 0,0467 | 479,5 | |

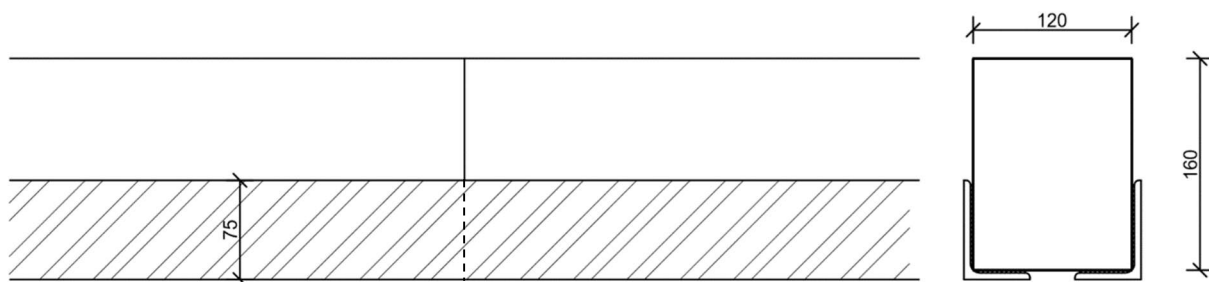
Po zjištění charakteristik dřevěných trámů byly tyto prvky upraveny na požadovanou délku 2 500 mm. Pro první spoj, který je proveden z ocelových přílozek (Obr. 24), posloužily trámy s číselným označením 1 a 2 dle Tab. 2. Druhý spoj tvořený přilepenými L-profilů (Obr. 25) je proveden na trámu 3 a 4. Všechny trámy byly rozříznuty na dvě části o dílcích velikostech 1 250 mm a tím připraveny pro opětovné spojení danými spojovacími prostředky.

Trám číslo 1 a 2 byl opatřen ocelovými přílozkami z plechu o rozměrech 100 x 500 mm a tloušťce 8 mm. K propojení obou přílozek posloužily šrouby s částečným závitem o průměru 12 mm v počtu osmi kusů na každý trám. Rozložení šroubů po příložce je patrný z Obr. 32.



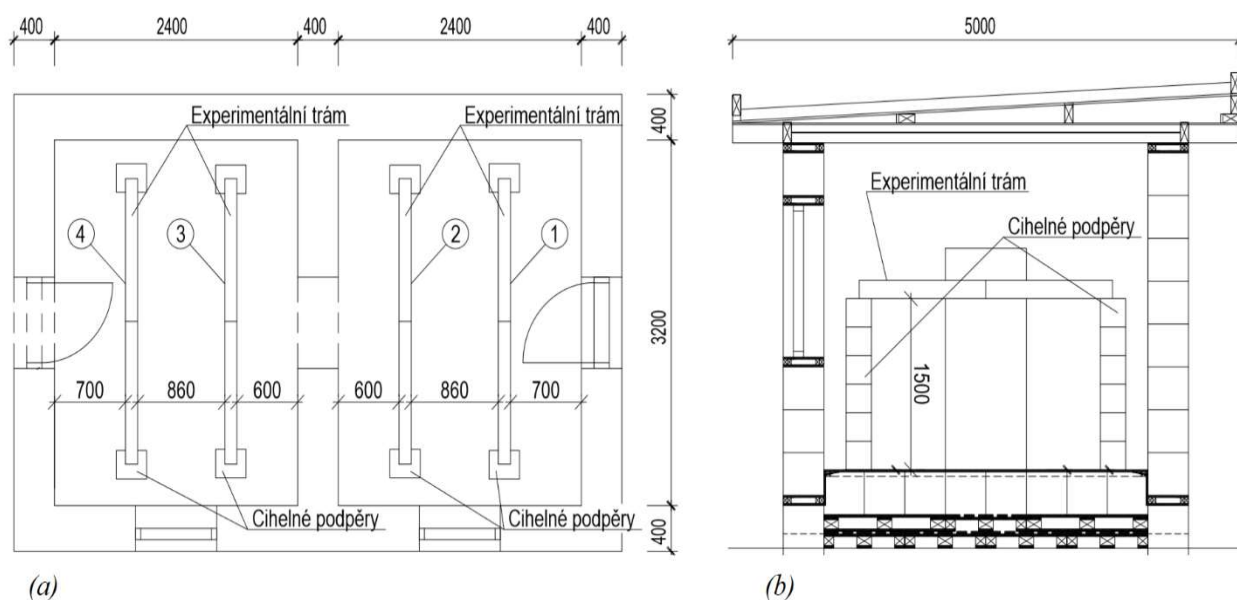
Obr. 32 Schéma umístění šroubů

Po spoji z ocelových přílohek bylo nutné provést spoj na zbylých dvou trámech číslo 3 a 4, který se skládal z ocelových L-profilů o rozměru 75x50x5 (Obr. 33). Tento spoj byl konstrukčně jednodušší, ale na rozdíl od prvního druhu spoje, který své maximální únosnosti nabývá okamžitě, lepený spoj je nutno před zatížením nechat dostatečně vytvrdnout, aby lepidlo dosáhlo své maximální pevnosti. Tuto dobu tvrdnutí udává výrobce lepidla. V tomto experimentu bylo využito lepidlo Sika Anchorfix 1, které dosahuje požadovaného vytvrzení v 85 minutě po aplikaci při teplotě od $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pro správné spojení materiálů byly ocelové L-profilů s dřevěným trámem po aplikaci lepidla zafixovány mechanickými svěrkami na dobu vytvrdnutí.



Obr. 33 Schéma umístění L-profilů

Všechny testované trámy byly umístěny do prostoru experimentálního objektu dle (Obr. 34a). Zkušební trámy se usadily na cihelné podpěry z cihel Porotherm 30 do výšky 1 500 mm na úroveň čisté podlahy slaměného objektu, viz (Obr. 34b). Tyto podpěry jsou také zobrazené na fotografiích (Obr. 36, Obr. 37).

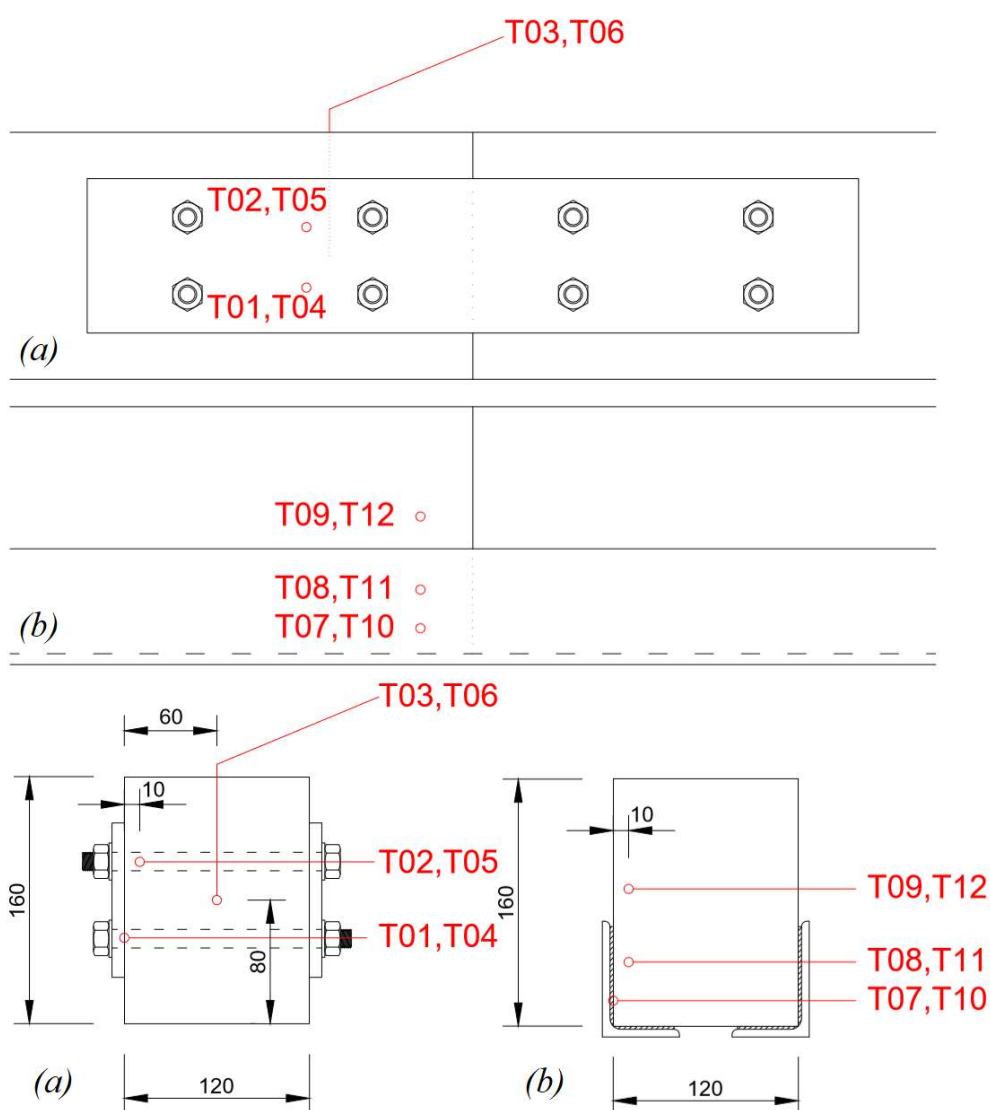


Obr. 34 Schéma umístění experimentálních trámů: (a) půdorys; (b) řez

5.2.2 Usazení termočlánku do experimentálních trámů

Pro zjištění chování spojů dřevěných konstrukcí při požáru bylo nutné stanovit teploty v průřezu během velkorozměrové požární zkoušky. K zjištění teplot se využívají termočlánky. Byly použity termočlánky typu „K“, které lze vložit do předem vyvrtaných otvorů v trámu.

Na každý experimentální trám bylo využito tři termočlánků, pro které byly předvrtány otvory o průměru 3 mm do požadovaných hloubek. Následně se do každého předvrtaného otvoru vložily termočlánky s označením T01 až T12. Polohy umístění termočlánků pro jednotlivé experimentální trámy jsou patrné z obrázku (Obr. 35).



Obr. 35 Umístění termočlánků: (a) experimentální trám 1 a 2, (b) experimentální trám 3 a 4

Usazení termočlánku na experimentální trám číslo 1 a 2 je vyobrazen na obrázku (Obr. 36), kde T01 a T04 zaznamenává teplotu oceli. Usazení na experimentální trám 3 a 4 na obrázku (Obr. 37), kde T07 a T10 zaznamenává teplotu oceli. Pro sledování teploty plynu uvnitř požárního úseku v experimentálním objektu sloužily termočlánky umístěné 0,5 m po podhledem.



Obr. 36

Fotografie zapojení termočládku do experimentálních trámů 1 a 2



Obr. 37 Fotografie zapojení termočlánků do experimentálního trámu 3 a 4

5.2.3 Provedení velkorozměrové požární zkoušky

Dne 20. září 2017 v dopoledních hodinách proběhla na pozemcích UCCEB v Buštěhradě velkorozměrová požární zkouška pořádaná fakultou stavební univerzity ČVUT v Praze a za asistence kladenského HZS.

Před samotným zahájením zkoušky bylo nutné vytvořit v experimentálním objektu nahodilé požární zatížení $p_n = 40 \text{ kg/m}^2$, které bylo tvořeno hranicí z vysušených dřevěných latí 40 x 60 mm. Dále bylo nutné veškeré termočlánky zapojit do ústředny (Obr. 38), která slouží jako sběrnice získaných dat z experimentu. Po zapojení byly termočlánky otestovány kapesním zapalovačem a bylo zjištěno, že termočlánek T09 je mimo provoz, a proto data z něho získaná nejsou nadále použita.



Obr. 38 *Fotografie slaměného objektu před započítím požární zkoušky*

Požár byl iniciován pomocí zažehnutí žlabů s petrolejem umístěných pod hranicí z dřevěných latí a dále až do ukončení požárního experimentu nebylo do rozvoje požáru zasahováno. Po celou dobu experimentu bylo okolí i samotný experimentální objekt monitorován HZS před nebezpečím rozšíření požáru mimo plochu určenou pro velkorozměrovou požární zkoušku. Průběh požárního experimentu je vyobrazen na následujících fotografiích s počtem minut od započetí experimentu a s teplotou plynu zaznamenanou uvnitř objektu v daný čas (Obr. 39, Obr. 40, Obr. 41, Obr. 42, Obr. 43, Obr. 44).



Obr. 39 Pohled na objekt při experimentu: $t = 4 \text{ min}$, $\theta_g = 198,5^\circ\text{C}$



Obr. 40 Pohled na objekt při experimentu: $t = 9 \text{ min}$, $\theta_g = 709,8^\circ\text{C}$



Obr. 41 Pohled na objekt při experimentu: $t = 13 \text{ min}$, $\theta_g = 750,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$



Obr. 42 Pohled na objekt při experimentu: $t = 31 \text{ min}$, $\theta_g = 1056,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$



Obr. 43 Pohled na trám 1,2 při experimentu: $t = 39 \text{ min}$, $\theta_g = 1065,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$



Obr. 44 Pohled na objekt při experimentu: (a) $t = 67 \text{ min}$, (b) $t = 84 \text{ min}$

Experimentální objekt se zřítíl po 66 minutě a hasičský záchranný sbor uhasil zbytky trosek z objektu. Zbytky ocelových spojů z experimentálních trámů byly vytaženy z trosek. Na spojích je vidět značná deformace vlivem vysokých teplot, převážně vlivem roztažnosti oceli (Obr. 45).



Obr. 45 Deformace spojovacích materiálů po experimentu

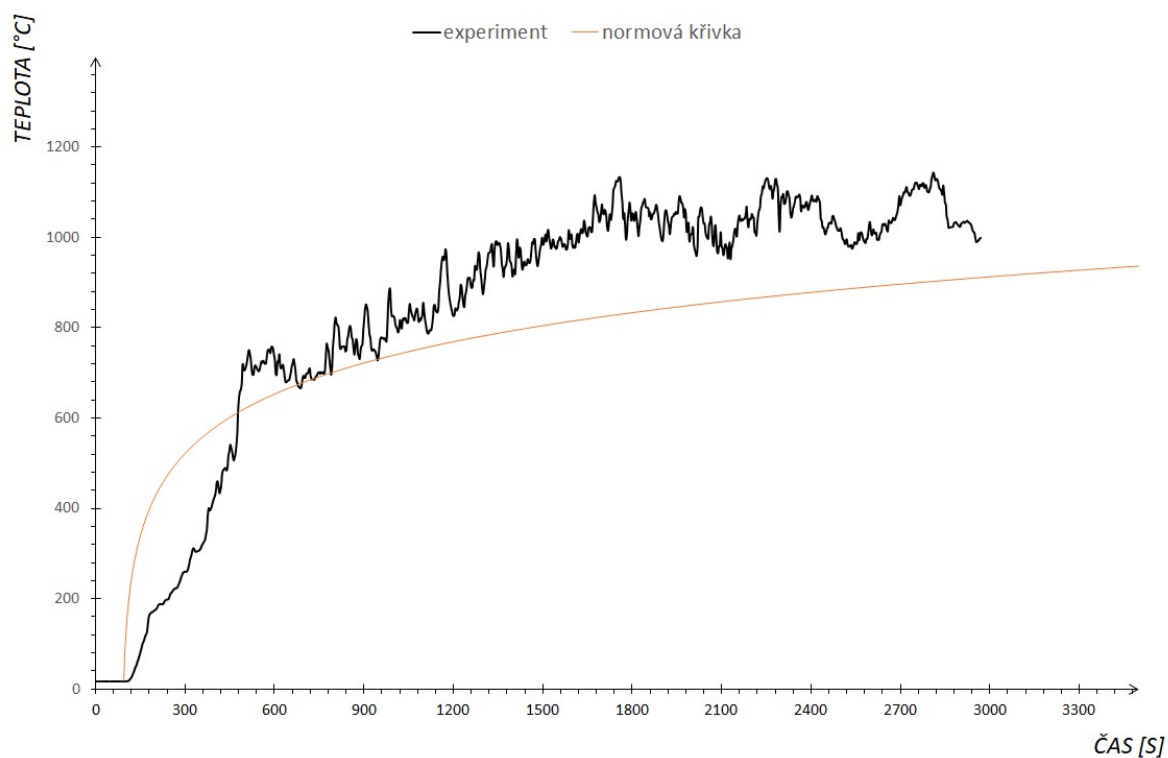
5.2.4 Výsledky z velkorozměrové požární zkoušky

Výsledky zaznamenané ústřednou byly zpracovány do tabulkového procesoru. Čas kolapsu experimentálních trámů je zaznamenan v tabulce (Tab. 3). Při experimentu vykazoval delší dobu únosnosti spoj pomocí příložek a kolíků. U trámů s L-profilů došlo už při relativně nízkých teplotách ke ztrátě únosnosti lepidla a k odchlípnutí ocele od dřeva.

Tab. 3 Čas kolapsu experimentálních trámů

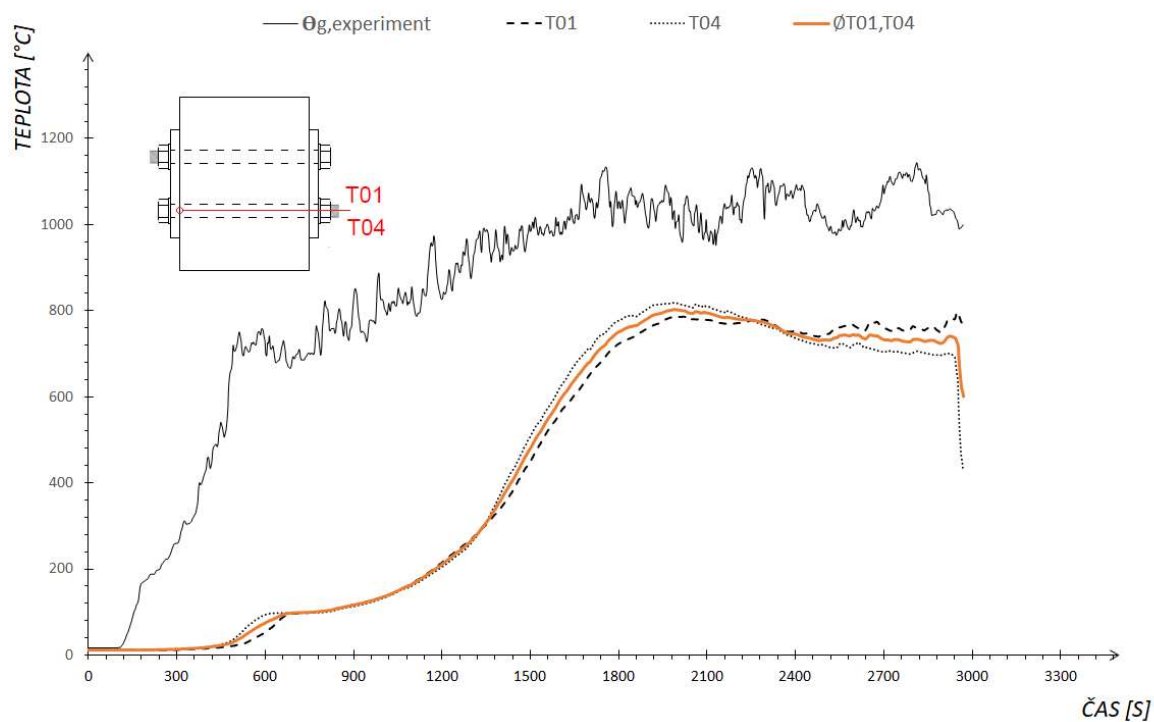
| č. | druh spoje | čas kolapsu [min] |
|----|------------|-------------------|
| 1 | příložky | 49 |
| 2 | příložky | 49 |
| 3 | L-profilů | 44 |
| 4 | L-profilů | 39 |

Při experimentu byla naměřena maximální teplota plynu $\theta_g = 1130$ °C, teplotní křivku zobrazuje graf (Graf 9) v porovnání s nominální normovou teplotní křivkou dle ČSN EN 1991-1-2.

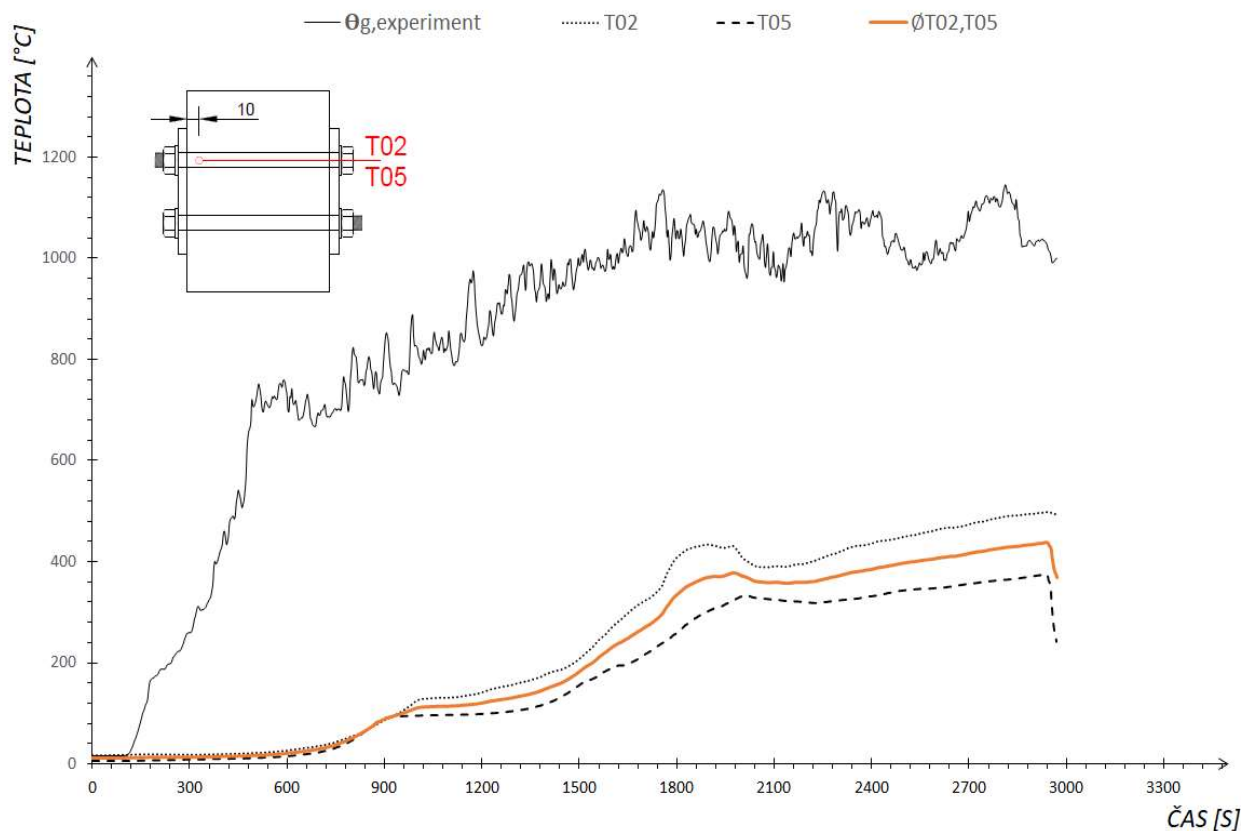


Graf 9 Graf tepelného rozvoje plynu při experimentu s porovnáním s normovou teplotní křivkou

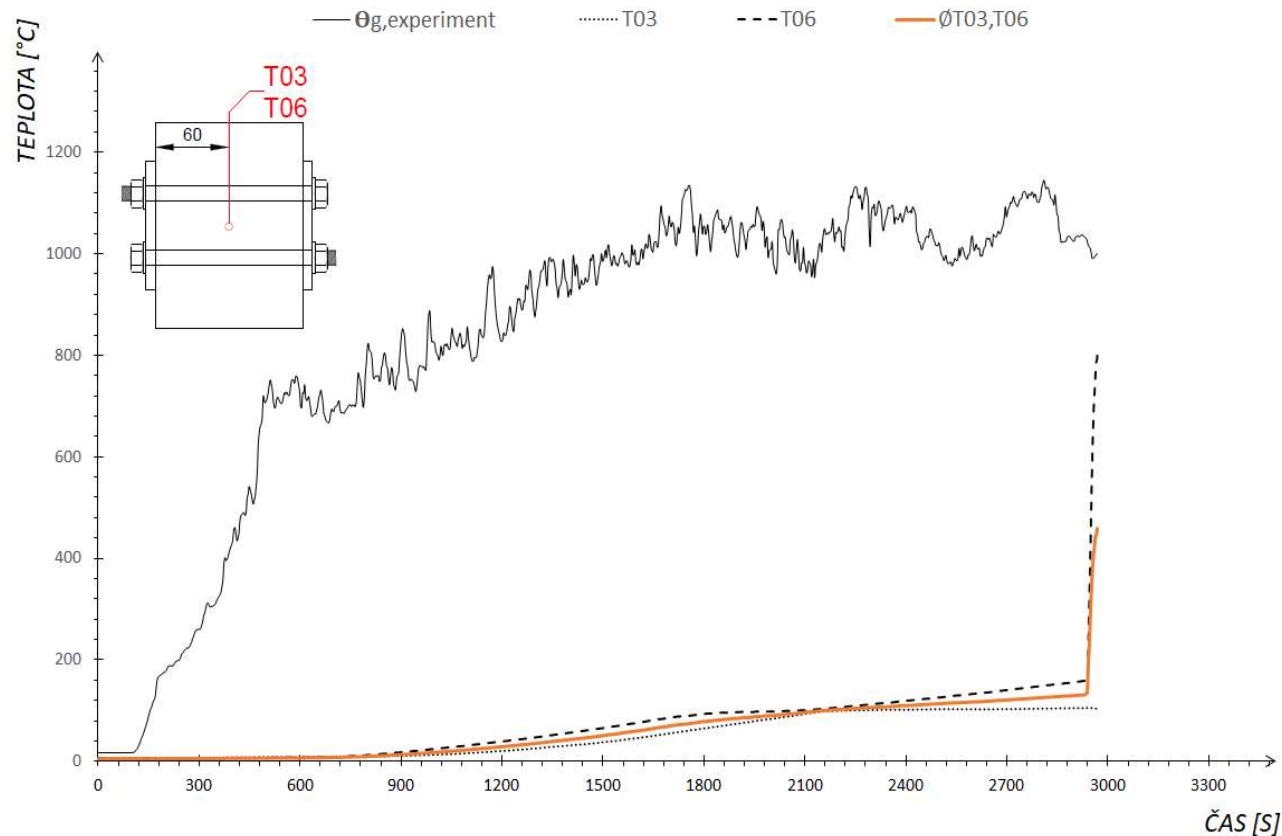
Z grafu je patrné, že rozvoj požáru v experimentálním objektu je svým rozvojem teploty podobný normové teplotní křivce. Na následujících grafech (Graf 10 - Graf 15) jsou zaznamenány teploty naměřené na jednotlivých termočláncích v závislosti na čase požární zkoušky.



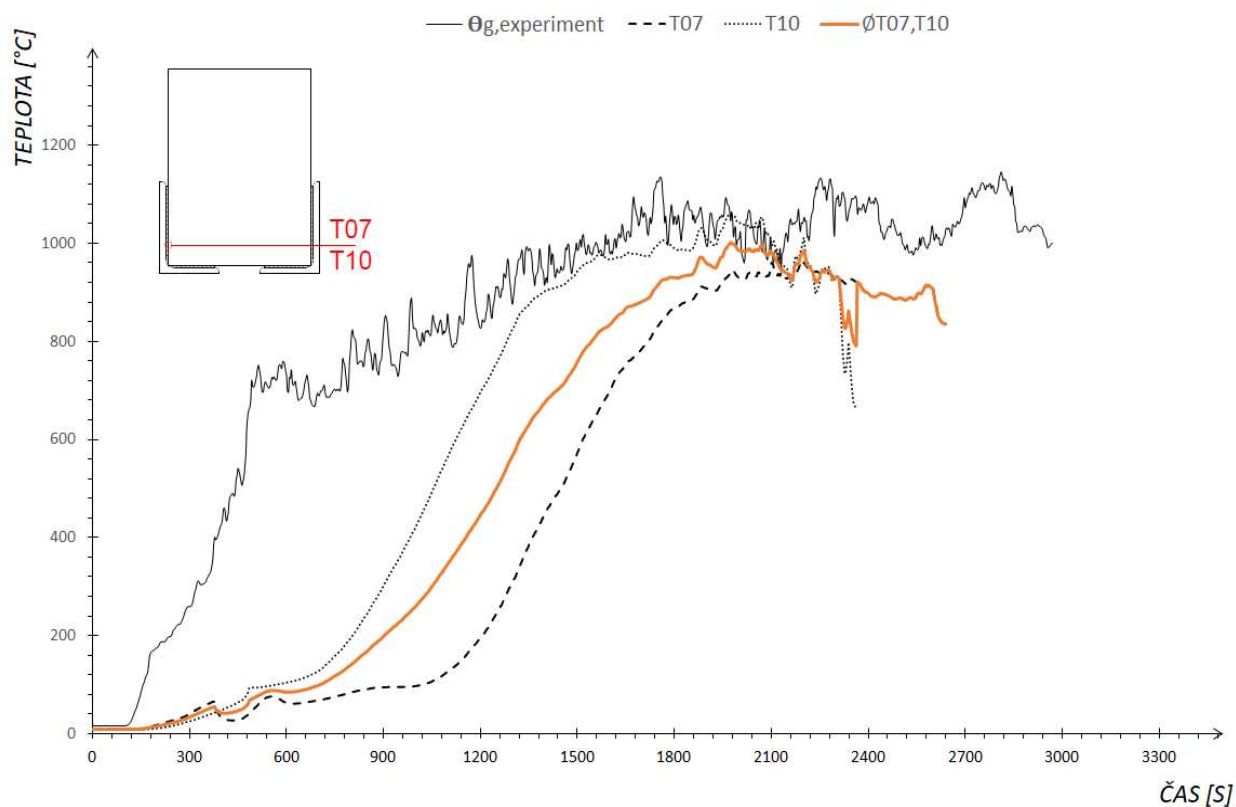
Graf 10 Teplota termočlánců 1 a 4 v závislosti na čase (data z velkorozměrové požární zkoušky)



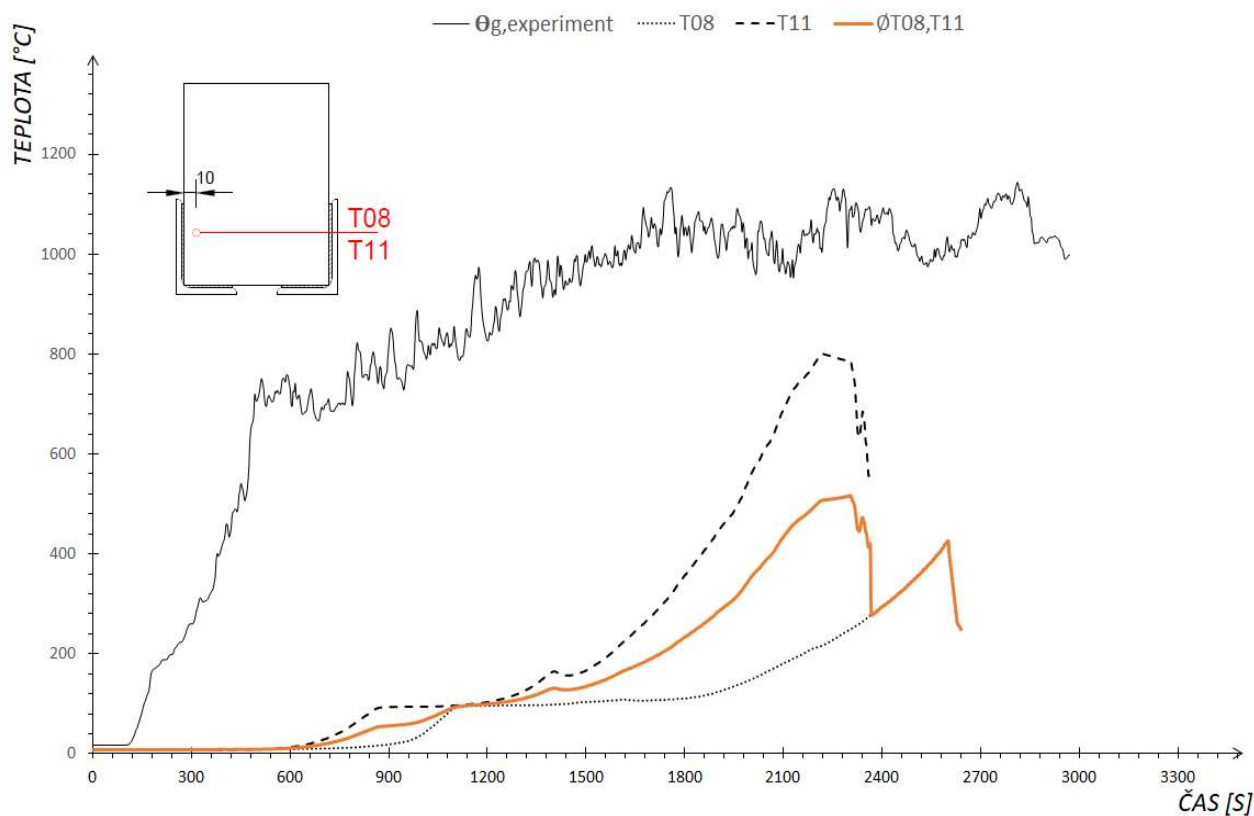
Graf 11 Teplota termočlánku 2 a 5 v závislosti na čase (data z velkorozměrové požární zkoušky)



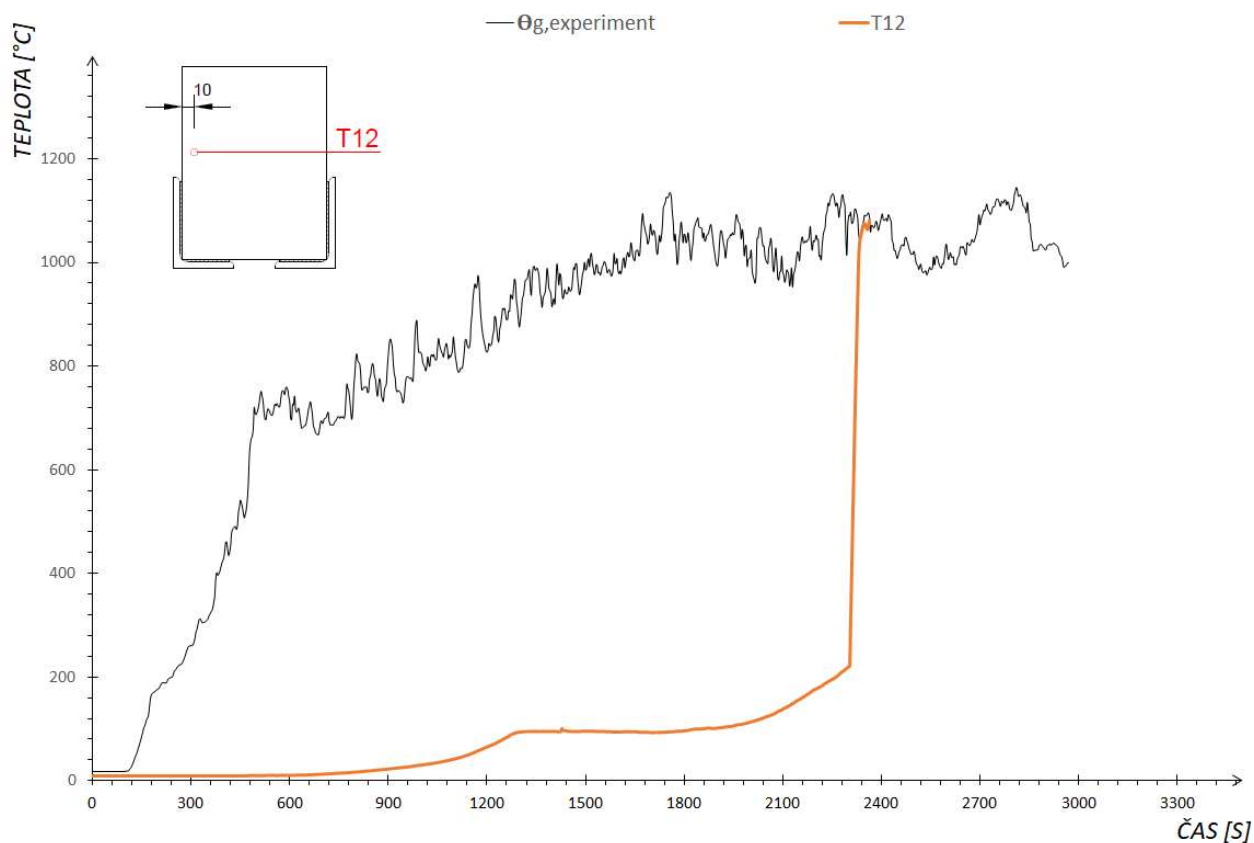
Graf 12 Teplota termočlánku 3 a 6 v závislosti na čase (data z velkorozměrové požární zkoušky)



Graf 13 Teplota termočládku 7 a 10 v závislosti na čase (data z velkorozměrové požární zkoušky)



Graf 14 Teplota termočládku 8 a 11 v závislosti na čase (data z velkorozměrové požární zkoušky)

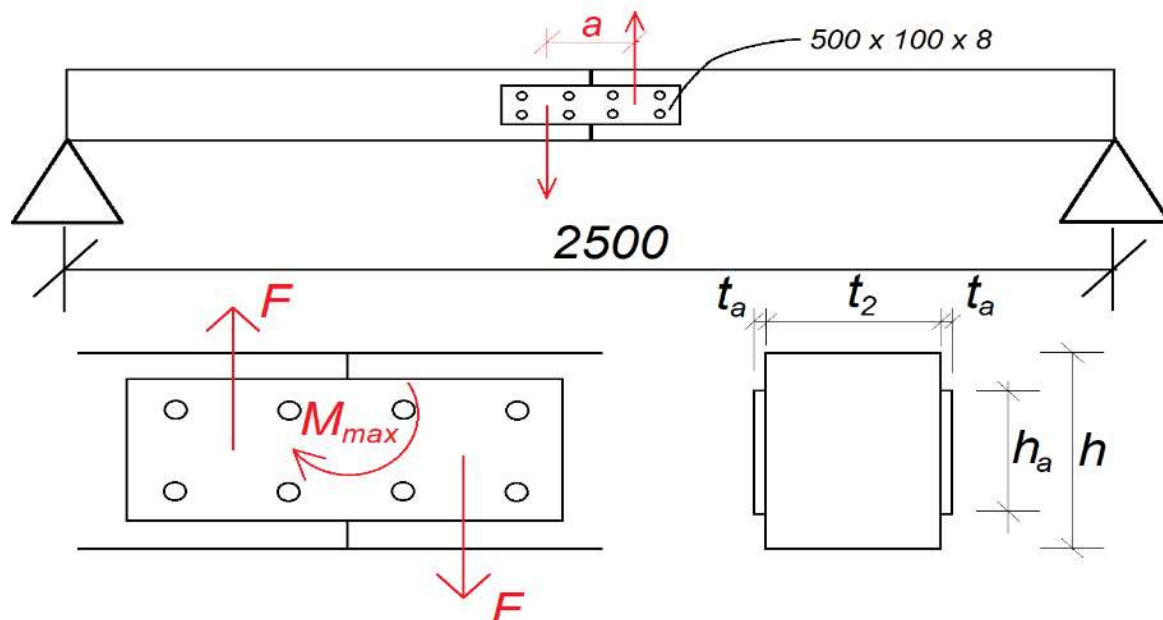


Graf 15 Teplota termočláčku 12 v závislosti na čase (data z velkorozměrové požární zkoušky)

Grafy jsou porovnávány a rozebírány v kapitole 5.5. Je však znatelné, že termočlánek číslo 12 (Graf 15) nezaznamenával teplotu správně, jelikož při odhořívání dřeva během požárního experimentu v hloubce 10 mm pod povrchem experimentálního trámu byla termočlánekem zaznamenána až nepravděpodobně nízká teplota.

5.3 Analytický výpočet

V této kapitole je podrobně vypočten návrh a posouzení spoje vnějšími ocelovými příložkami, kde je následně pomocí tzv. přírůstkové metody zjištěna teplota ocelových příložek v daném čase.



Obr. 46 Schéma posuzovaného nosníku

Vstupní údaje:

$$f = 0,09 \frac{kN}{m}$$

hodnota liniového zatížení (vlastní hmotnost trámu)

$$k_{mod,fi} = 1$$

modifikační součinitel pro požár dle (10)

$$\gamma_{M,fi} = 1$$

dílčí součinitel spolehlivosti materiálu dle (10)

$$k_{fi} = 1,05$$

hodnota dle (10)

$$k_{mod} = 0,8$$

hodnota dle (10)

$$n_{1r} = 2$$

počet spojovacích prostředků v jedné řadě

$$n_{sr} = 2$$

počet stříhů – dvoustřížný

$$\gamma_M = 1,3$$

dílčí součinitel spolehlivosti materiálu dle (11)

$$l = 2,5 m$$

délka dřevěného prvku (trámu)

5.3.1 Návrh spoje s dvěma ocelovými příložkami

Výpočet návrhové únosnosti spoje při běžné teplotě dle ČSN EN 1995-1-1

Výpočet charakteristické hodnoty odolnosti jednoho spojovacího prostředku při běžné teplotě

Vstupní data:

$$t_2 = 120 \text{ mm} \quad \alpha = \frac{\pi}{2} \text{ rad} \quad \rho_k = 476,55 \text{ kg/m}^3 \quad d = 12 \text{ mm}$$

Vzdálenost spojovacích prvků proti směru vláken, ve směru působící síly se vypočte dle rovnice (5.13) z tab.8.4 v ČSN EN 1995-1-1:

$$a_2 = 4 \cdot d = 48 \text{ mm} \quad (5.13)$$

Efektivní počet spojovacích prvků v jedné řadě $n_{ef} = n_{1r}$ platí pro směr namáhání kolmo k vláknům dle (11).

$$f_{h,0,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k = 39,072 \text{ MPa} \quad (5.14)$$

Rovnice (5.14) popisuje charakteristickou pevnost v otláčení. Dále je nutné vypočíst součinitel k_{90} , který se vypočte dle (11) následujícím vztahem (5.15).

$$k_{90} = 1,34 + 0,015 \cdot d = 1,53 \quad (5.15)$$

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \cdot \sin(\alpha)^2 + \cos(\alpha)^2} = 25,537 \text{ MPa} \quad (5.16)$$

Pro výpočet charakteristické pevnosti v otláčení stěny otvoru se dle (11) využívá vztah (5.16). Dále je před výpočtem návrhové pevnosti nutné vyjádřit plastický moment únosnosti, který se za předpokladu, že $f_{u,k} = 600 \text{ MPa}$ vypočte následujícím vztahem (5.17).

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6} = 115\,100 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad (5.17)$$

Charakteristická únosnost spoje pro jeden střih za předpokladu, že $f_{h,2,k} = f_{h,\alpha,k}$ a $f_{ax,Rk} = 0$ se vypočte dle (11) jako (5.18).

$$F_{v,Rk} = \min\langle F_{v,Rk,1}, F_{v,Rk,2} \rangle = 12\,832 \text{ N} \quad (5.18)$$

kde se $F_{v,Rk,1} = 0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d = 18\,386 \text{ N}$

$$\text{a } F_{v,Rk,2} = 2,3 \cdot \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,2,k} \cdot d} + \frac{f_{ax,Rk}}{4} = 12\,832 \text{ N}$$

Výsledná návrhová hodnota odolnosti spoje při běžné teplotě se podle (11) stanoví jako (5.19)

$$F_{v,Rd} = k_{mod} \cdot \frac{F_{v,Rk} \cdot (n_{ef} \cdot n_{sr})}{\gamma_M} = 31\,586\,N \quad (5.19)$$

Návrhové účinky vnějšího zatížení na spoj při běžné teplotě se stanoví z liniového zatížení. Spoj budeme navrhovat na maximální vyvozený moment ve spoji, který se vypočte dle jednoduché rovnice (5.20).

$$M = \frac{f \cdot l^2}{8} = 70,31\,N \cdot m \quad (5.20)$$

Nyní, když víme velikost maximálního momentu, musíme si moment vyjádřit pomocí dvojce sil působících na rameni $a = 0,25\,m$. Vyvozená síla F se spočte dle vztahu (5.21).

$$F = \frac{M}{a} = 281,25\,N \quad (5.21)$$

$$F = E_d$$

Uspokojující únosnost spoje za běžné teploty vyhoví tehdy, pokud poměr vyvozené síly na spoj a návrhové únosnosti spoje splňuje podmínky rovnice (5.22).

$$\frac{E_d}{F_{v,Rd}} = 0,009 \leq 1 \quad (5.22)$$

Výpočet návrhové únosnosti spoje při požáru dle ČSN EN 1995-1-2

Maximální návrhová odolnost nechráněného spoje se posuzuje s ohledem na únosnost spoje při požáru a čas, ve kterém dojde k porušení spoje. Tento čas udává požární odolnost spoje a stanoví se dle rovnice (5.23).

$$t_{d,fi,max} = -\frac{1}{k} \cdot \ln \left(\eta_{fi} \cdot \eta_0 \cdot \frac{k_{mod}}{\gamma_M} \cdot \frac{\gamma_{M,fi}}{k_{fi}} \right) = 61,7\,min \quad (5.23)$$

Pro výpočet této rovnice je nutné stanovit parametr k , který nalezneme v normě EN 1995-1-2, tab. 6.3. V tomto případě je $k = 0,085$. Redukční součinitel η_{fi} při požáru zvolíme $\eta_{fi} = 1$ z důvodu neměnného zatížení během požárního experimentu. Stupeň využití η_0 nám udává rovnice (5.22).

Z rovnice (5.23) jsme vypočetli, že požární odolnost spoje je 61,7 min, což nám po převedení na stanovované mezní stavy udává požární odolnost R60. V normě ČSN EN 1995-1-2 (tab. 6.3 Parametr k) je však uvedeno, že spoj *kolík-ocel-dřevo* má maximální požární odolnost 30 minut. V dalších výpočtech tedy budeme používat pro požární odolnost spoje hodnotu $t_{d,fi,req} = 30\,minut$.

Nyní je nutné posoudit spoj v rámci únosnosti v daném čase požární odolnosti, a to dle rovnice (5.24).

$$F_{v,Rd,fi} = \eta \cdot \frac{F_{v,Rk} \cdot (\eta_{ef} \cdot \eta_{sr}) \cdot k_{fi}}{\gamma_{M,fi}} = 323 \text{ N} \quad (5.24)$$

Kde $\eta_{ef} = \eta_{1r}$ v případě namáhání kolmo k vláknům a převodní součinitel η se vypočte dle (5.25).

$$\eta = e^{-k \cdot t_{d,fi,req}} = 0,006 \quad (5.25)$$

Za e dosadíme tzv. Eulerovo číslo, která je rovna $e = 2,718$. Nyní můžeme posoudit, zdali únosnost spoje vyhoví na účinky požáru pomocí následující rovnice (5.26).

$$\frac{E_{d,fi}}{F_{v,Rd,fi}} = 0,87 \leq 1 \quad (5.26)$$

Kde hodnota $E_{d,fi}$ vlivem redukčního součinitele $\eta_{fi} = 1$ zůstává nezměněna, tudíž jako E_d .

Jak bylo řečeno v kapitole 0 je spoj nutné posoudit i z hlediska únosnosti samotných ocelových příložek. Nejprve je nutné definovat kritickou teplotu ocelových příložek, následně jejich samotnou únosnost při této kritické teplotě a zdali této teploty nedosáhnou již v době před deklarovanou požární odolností.

Stanovení únosnosti vnějších ocelových desek v čase "t" požáru dle ČSN EN 1993-1-2

Výpočet kritické teploty vnějších ocelových desek v čase t požáru se vypočte dle vztahu (5.27)

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \cdot \ln \left(\frac{1}{0,9674 \cdot \mu_0^{3,833}} - 1 \right) + 482 \quad (5.27)$$

Abychom mohli tuto rovnici vypočítat musíme zjistit hodnotu μ_0 . Nejprve je nutné zjistit návrhový účinek zatížení na jednu ocelovou desku, který vystihuje rovnice (5.28).

$$E_{fi,d} = (E_{d,fi} \cdot 0,5) = 140,6 \text{ N} \quad (5.28)$$

Návrhová únosnost taženého prvku při rovnoměrném rozdělení teploty θ_a je dána výpočetním vztahem (5.29).

$$N_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} \cdot N_{Rd} \left(\frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} \right) \quad (5.29)$$

Nejprve je však nutné si stanovit vstupní data ocelové příložky, které bude dosazovat do rovnic.

Vstupní data:

| | |
|---|--|
| $t_a = 8 \text{ mm}$ | tloušťka vnější ocelové příločky |
| $h_a = 100 \text{ mm}$ | výška vnější ocelové příločky |
| $d_0 = d + 2 = 14 \text{ mm}$ | tloušťka vnější ocelové příločky |
| $A_{net} = t_a \cdot h_a - n_{1r} \cdot d_0 \cdot t_a = 576 \text{ mm}^2$ | tloušťka vnější ocelové příločky |
| $\gamma_{M0} = 1$ $\gamma_{M2} = 1,25$ | dle (3) |
| $f_u = 360 \text{ MPa}$ | mez pevnosti ocelové příločky |
| $\rho_a = 7\,850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ | během požáru se hustota oceli uvažuje konstantní |

Nyní vypočteme návrhovou únosnost taženého prvku za běžné teploty, a to dle vzorce (5.30).

$$N_{u,Rd} = 0,9 \cdot A_{net} \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M2}} = 149,3 \text{ kN} \quad (5.30)$$

Když máme zjištěnou hodnotu únosnosti za běžné teploty, tak nám zbývá dosadit do rovnice (5.29) pro návrhovou únosnost taženého prvku při rovnoměrném rozdělení teploty θ_a .

$$N_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} \cdot N_{Rd} \cdot \left(\frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} \right) = 149,3 \text{ kN}$$

Kde N_{Rd} se rovná $N_{u,Rd}$. Návrhová únosnost $R_{fi,d,0} = N_{fi,\theta,Rd}$. Nyní už lze vypočíst stupeň využití μ_0 který se vypočte z rovnice (5.31).

$$\mu_0 = \max\{\mu_{0,aux}; 0,013\} = 0,013 \quad (5.31)$$

Nesmí se použít hodnota menší než 0,013. Hodnota $\mu_{0,aux}$ se vypočte dle rovnice (5.32)

$$\mu_{0,aux} = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}} = 0,0009 \quad (5.32)$$

Nyní už lze vypočíst kritickou teplotu, a to dosazením do rovnice (5.27).

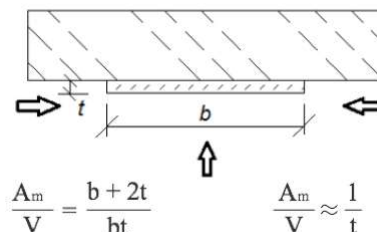
$$\theta_{a,cr} = 39,19 \cdot \ln \left(\frac{1}{0,9674 \cdot \mu_0^{3,833}} - 1 \right) + 482 = 1135,65 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Když máme zjištěnou velikost kritické teploty ocelové vnější příločky, musíme určit, zdali v době požární odolnosti 30 minut nedosáhne ocel této kritické teploty. Teplotu oceli v době 30 minut zjistíme dvěma způsoby. Analytické řešení se provede pomocí tzv. přírůstkové metody, kdy využijeme pro zjednodušení výpočtu tabulkový procesor *Microsoft Excel 2016*.

Stanovení teploty ocelových příložek v daném čase požadované požární odolnosti

Přírůstek teploty v nechráněném prvku v intervalu Δt :

Nejprve je nutné si stanovit součinitel průřezu, který se určí dle (3). V našem případě je to plochá tyč vystavená požáru ze tří stran (Obr. 47).



Obr. 47 Schéma použitého průřezu pro výpočet součinitele průřezu (3)

Teplota ocelové desky se vypočte dle vztahu (5.33), kde A_m/V spočteme dle vztahu z obrázku (Obr. 47). Hustota ρ_a zůstává konstantní $7\,850\text{ kg/m}^3$.

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \cdot \frac{\frac{A_m}{V}}{c_a \cdot \rho_a} \cdot h_{net} \cdot \Delta t \quad (5.33)$$

Po vypočtení součinitele průřezu je ještě nutné zjistit hodnotu k_{sh} , která se vypočte podle rovnice (5.34).

$$k_{sh} = \frac{\frac{A_{m,b}}{V_b}}{\frac{A_m}{V}} = \frac{\frac{h_a + 2 \cdot t_a}{h_a \cdot t_a}}{\frac{h_a + 2 \cdot t_a}{h_a \cdot t_a}} = 1 \quad (5.34)$$

Nyní je ještě nutné určit měrnou tepelnou kapacitu c_a , která se liší dle teploty podle následujících pravidel dle (3)

$$c_a = \begin{cases} 425 + 7,73 \cdot 10^{-1} \cdot \theta_a - 1,69 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_a^2 + 2,22 \cdot 10^{-6} \cdot \theta_a^3 & \text{if } 20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 600^\circ\text{C} \\ 666 + \frac{13\,002}{738 - \theta_a} & \text{if } 600^\circ\text{C} \leq \theta_a < 735^\circ\text{C} \\ 543 + \frac{17\,820}{\theta_a - 731} & \text{if } 735^\circ\text{C} \leq \theta_a < 900^\circ\text{C} \\ 650 & \text{if } 900^\circ\text{C} \leq \theta_a < 1200^\circ\text{C} \end{cases}$$

Ještě je nutné si stanovit předpis pro nominální normovou křivku (5.35), kterou při tomto příkladu použijeme. Minimální teplota je zvolená $16,9^\circ\text{C}$, která byla změřena při požárním experimentu.

$$\theta_g = 16,9 + 345 \cdot \log(8t + 1) \quad (5.35)$$

A také je potřeba zjistit velikost tepelného toku $h_{net,d}$. Tato hodnota se vypočte ze vztahu (5.36).

$$h_{net,d} = h_{net,c} + h_{net,r} \quad (5.36)$$

Velikost $h_{net,c}$ vypočteme podle rovnice (5.37), kde součinitel přestupu tepla prouděním je $\alpha_c = 25 \text{ Wm}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, θ_g je teplota plynu a θ_m teplota oceli. Hodnota $h_{net,r}$ je dána vztahem (5.38), kde účinky zastínění $\phi = 1$, emisivita požáru $\varepsilon_f = 1$, emisivita oceli $\varepsilon_m = 0,7$ a Stephan-Boltzmannova konstanta $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-2}$.

$$h_{net,c} = \alpha_c \cdot (\theta_g - \theta_m) \quad (5.37)$$

$$h_{net,r} = \phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad (5.38)$$

Výsledná teplota prvku v daném čase je dána sečtením předchozí teploty a teplotního přírůstku (5.39) za daný časový skok, který jsem pro případy výpočtu přírůstkovou metodou zvolil 5 s.

$$\theta_{a,t,i} = \theta_{a,t,i-1} + \Delta\theta_{a,t} \quad (5.39)$$

Tyto vzorce byly zadány do tabulkového procesoru *Microsoft Excel 2016* a výsledky jsou zaneseny do následující tabulky (Tab. 4), která popisuje vývoj teploty v ocelovém prvku.

Tab. 4 Výstup z tabulkového procesoru pro výpočet teploty oceli

| čas [min] | čas [sec] | θ_g [$^\circ\text{C}$] | $h_{net,r}$ [W/m^2] | $h_{net,c}$ [W/m^2] | $h_{net,d}$ [W/m^2] | c_a [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$] | $\theta_{a,t}$ [$^\circ\text{C}$] |
|--------------|--------------|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--|--|
| 0 | 0 | 16,9 | 0 | 0 | 0 | 438 | 16,9 |
| 1 | 60 | 346,1 | 4034 | 3946 | 7981 | 525 | 188,3 |
| 2 | 120 | 441,4 | 4205 | 2186 | 6391 | 585 | 354,0 |
| 5 | 300 | 573,3 | 1397 | 373 | 1770 | 716 | 558,4 |
| 15 | 900 | 735,5 | 1072 | 166 | 1238 | 2081 | 728,8 |
| 30 | 1800 | 838,7 | 180 | 21 | 200 | 712 | 837,9 |
| 45 | 2700 | 899,2 | 104 | 10 | 114 | 651 | 898,8 |
| 60 | 3600 | 942,2 | 77 | 7 | 83 | 650 | 942,0 |

Z tabulky (Tab. 4) vyplývá, že v čase $t = 30 \text{ minut}$ nedojde ke kritické teplotě, a tudíž spoj pomocí vnějších ocelových desek splňuje požadovanou požární odolnost R 30.

5.3.2 Výpočet hloubky zuhelnatění experimentálního trámu

Výpočet redukce průřezu experimentálního trámu při zatížení nominální normovou teplotní křivkou dle ČSN EN 1995-1-2

Nyní vypočteme hloubku zuhelnatění dřevěné vrstvy pro stanovení zbytkového průřezu experimentálního trámu o rozměru 120 x 160 mm, kde nám tento údaj bude sloužit k určení tzv. izoterm 300. Velikosti účinné hloubky zuhelnatění vystihuje rovnice (5.40).

$$d_{ef} = d_{char} + k_0 \cdot d_0 \quad (5.40)$$

Kde d_{char} je hloubka zuhelnatění, která se vypočte dle rovnice (5.41), k_0 je součinitel tloušťky vrstvy, kterým se upravuje hodnota $d_0 = 7 \text{ mm}$, což je vrstva s předpokladem nulové pevnosti. Hodnotu k_0 vystihuje (Tab. 5), kde $t_{fi,req}$ je požadovaná požární odolnost.

Tab. 5 Součinitel tloušťky vrstvy nulové pevnosti k_0 pro nechráněné povrchy (9)

| | | |
|--------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| Nechráněné povrchy | $t_{fi,req} < 20 \text{ min}$ | $k_0 = \frac{t_{fi,req}}{20}$ |
| | $t_{fi,req} \geq 20 \text{ min}$ | $k_0 = 1,0$ |

$$d_{char} = \beta_0 \cdot t \quad (5.41)$$

Kde $\beta_0 = 0,8 \text{ mm/min}$ je rychlost zuhelnatění pro rostlé dřevo a t je čas požáru. Nyní, když víme všechny požadované neznámé, můžeme zjistit zbytkový průřez dřevěného trámu odečtením účinné hloubky zuhelnatění od původního trámu dle (5.42).

$$D_{ef} = D - 2 \cdot d_{ef} \quad (5.42)$$

Efektivní hloubku zuhelnatění odečítáme dvakrát, jelikož je trám vystaven požáru ze všech stran. D_{ef} je účinný průřez a D původní velikost průřezu před požárem. K výpočtu velikosti účinného průřezu byl využit tabulkový procesor *Microsoft Excel 2016* (Tab. 6).

Tab. 6 Výstup z tabulkového procesoru pro výpočet účinného průřezu

| čas [min] | β_0 [mm/min] | d_{char} [mm] | k_0 | d_{ef} [mm] | D_{ef} [mm] | H_{ef} [mm] |
|--------------|-----------------------|--------------------|-------|------------------|------------------|------------------|
| 0 | 0,8 | 0 | 0 | 0 | 120 | 160 |
| 1 | 0,8 | 0,8 | 0,05 | 1,15 | 117,7 | 157,7 |
| 5 | 0,8 | 4 | 0,25 | 5,75 | 108,5 | 148,5 |
| 15 | 0,8 | 12 | 0,75 | 17,25 | 85,5 | 125,5 |
| 30 | 0,8 | 24 | 1 | 31 | 58 | 98 |
| 45 | 0,8 | 36 | 1 | 43 | 34 | 74 |
| 60 | 0,8 | 48 | 1 | 55 | 10 | 50 |

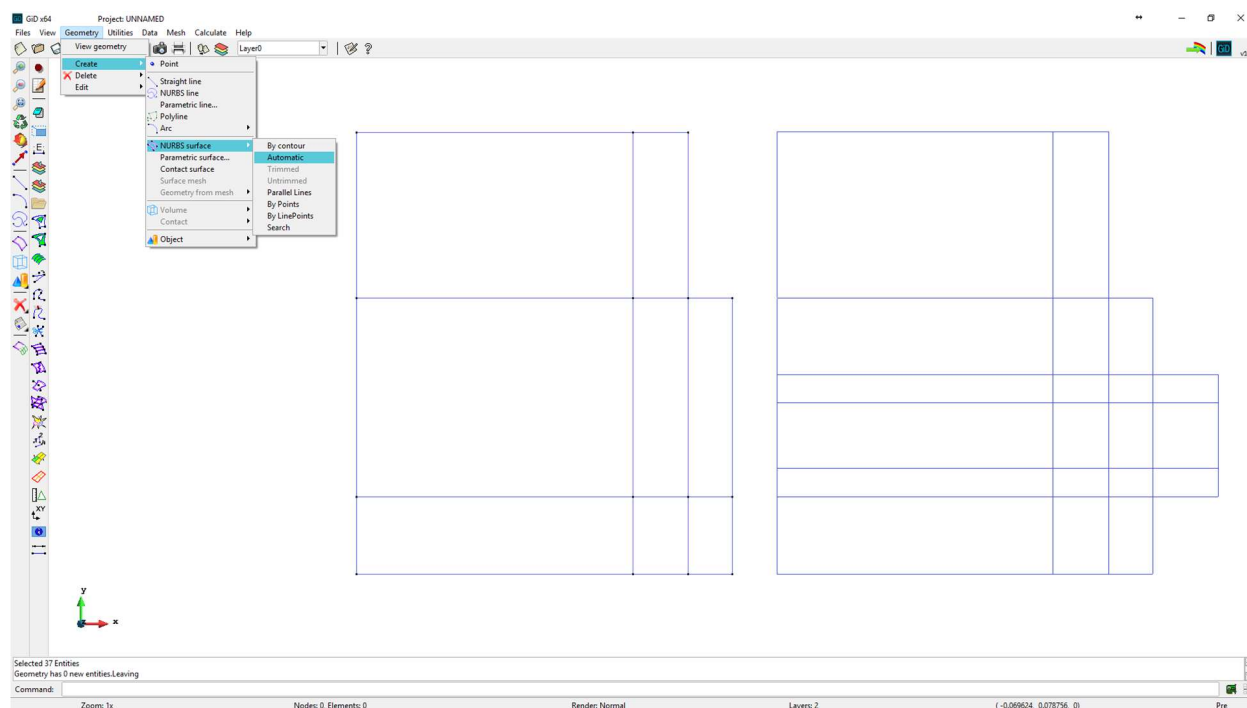
5.4 Posouzení spojů pomocí softwaru Atena

K určení kritické teploty ocelových spojovacích prostředků a rozložení teplot po průřezu bylo využito také výpočetního softwaru Atena, který využívá metodu konečných prvků. Pro zatížení spojů požárem bylo využito parametrické teplotní křivky, která napodobovala křivku požáru při velkorozměrové požární zkoušce a normové teplotní křivky. Do průřezů experimentálních trámů byly vsazeny termočlánky dle experimentu, které vyhodnocovaly teplotu v závislosti na času.

5.4.1 Postup výpočtu pro spoj pomocí ocelových příložek

V této kapitole se budeme zabývat prvním typem spoje, což je spoj tvořený pomocí dvou ocelových příložek. Tento spoj byl softwarem Atena posuzován ve dvou průřezech. První průřez byl v místě bez ocelového svorníku a druhý průřez byl v místě ocelového svorníku, z důvodu rozdílného přenosu tepla přes kolík a mimo něj. Nejprve si ukážeme postup zadávání vstupních dat a následně samotné výsledky z teplotní analýzy.

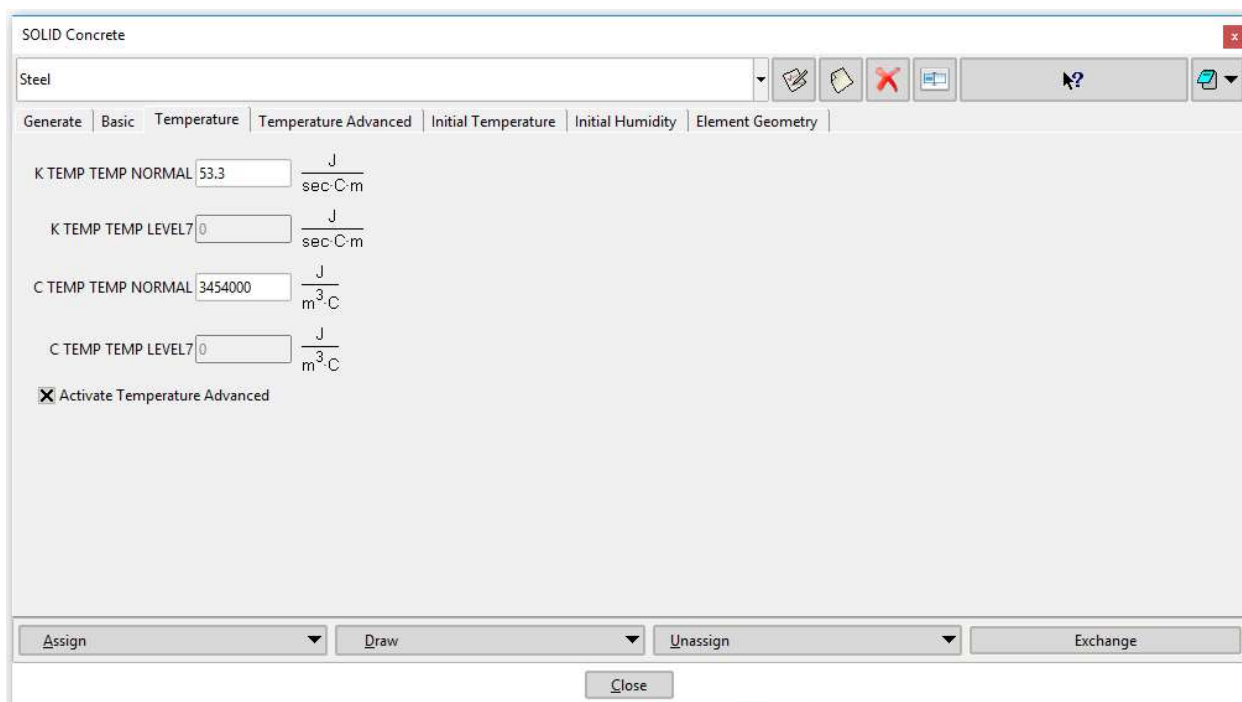
K výpočtu bylo využito studentské verze softwaru GiD 13.0.2 (dále jen GiD), který slouží jako preprocesor k softwaru Atena. Průřezy daných experimentálních trámů byly předem namodelovány v programu AutoCAD a následně nainportovány do programu GiD (Obr. 48). Vzhledem k tomu, že studentská verze umožňuje pouze omezený počet výpočetních ploch, je modelována pouze symetrická $\frac{1}{4}$ průřezu.



Obr. 48 Schéma tvarů průřezu v softwaru GiD

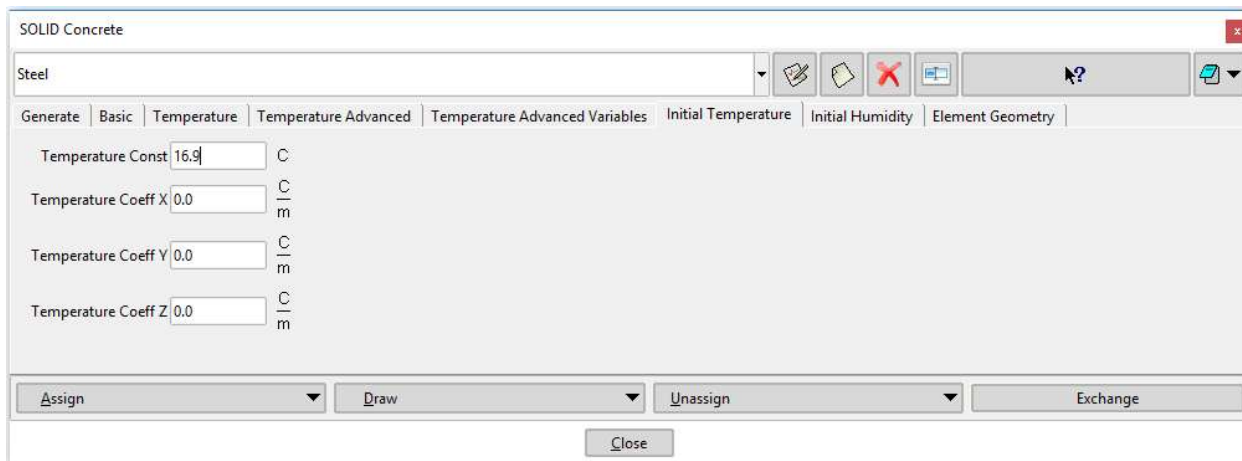
Po importování průřezů je nutné vytvořit plochy, které budou následně reprezentovat nadefinované druhy materiálů. V softwaru GiD je nutné každý materiál zvlášť nadefinovat pomocí vložení dat charakterizujících daný materiál a potřebných pro teplotní analýzu. Pro tuto práci bylo nutné znát

parametry měrné tepelné kapacity (v softwaru GiD značené jako C), která je závislá na hustotě materiálu, která je změřena na experimentálních trámech a součiniteli tepelné vodivosti (v softwaru GiD značené jako K). Pro tyto vlastnosti bylo nutné znát také jejich funkce hodnot v závislosti na teplotě, které jsou definovány normou, viz kapitola 4.3 a 4.4.1. Postup definování vlastností nového materiálu za běžné teploty v softwaru GiD je popsán na obrázku (Obr. 49).

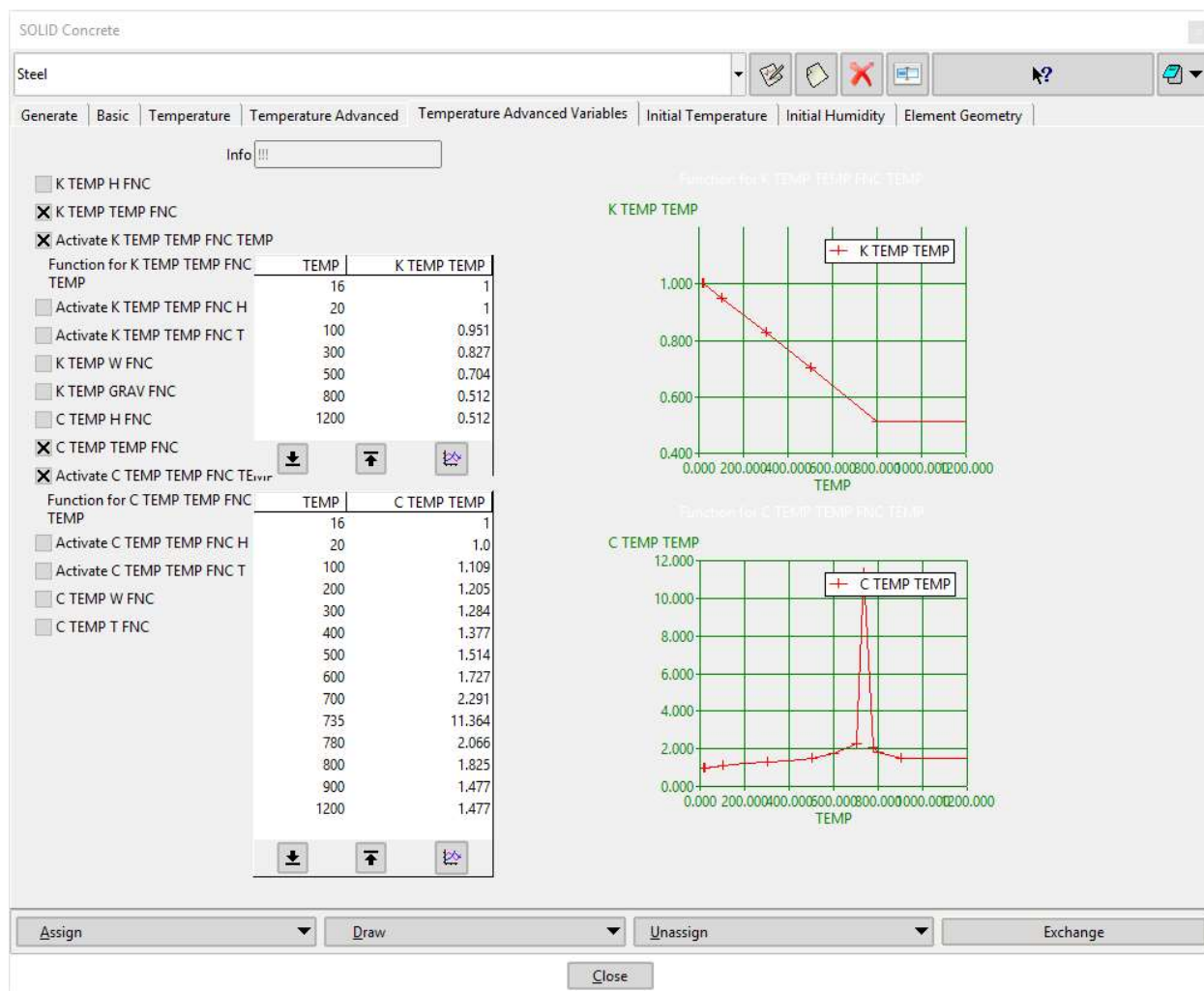


Obr. 49 Vlastnosti oceli při teplotě 20 °C

Po vložení vlastností materiálu za pokojové teploty je nutné nadefinovat změny těchto charakteristik vlivem zvýšené teploty materiálu. Tato zadávaná data reprezentuje (Obr. 51) pro součinitel tepelné vodivosti a pro měrnou tepelnou kapacitu. Hodnoty funkce za zvýšené teploty se do softwaru zadávají jako násobek velikosti hodnoty za pokojové teploty. Jako poslední před přiřazením materiálu je nutné nastavit počáteční teplotu materiálu, která byla vložena 16,9 °C, jakož venkovní teplota při velkorozměrové požární zkoušce (Obr. 50).



Obr. 50 Nastavení počáteční teploty oceli



Obr. 51 Nadefinování funkcí součinitele tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity v závislosti na teplotě pro ocel

Na stejném principu se definuje materiál pro dřevo. Vlastnosti dřeva za běžné teploty jsou znázorněny na obrázku (Obr. 52) a funkce vývoje závislé na teplotě na následujícím (Obr. 53).

The screenshot shows the 'SOLID Concrete' software interface. The 'Timber' material is selected. The 'Temperature Advanced Variable' tab is active. The 'Function for K TEMP TEMP NORMAL' is defined by a table:

| TEMP | K TEMP TEMP |
|------|-------------|
| 16 | 0.12 |
| 20 | 0.12 |
| 100 | 0.12 |
| 300 | 0.12 |
| 500 | 0.12 |
| 800 | 0.12 |
| 1200 | 0.12 |

The 'Function for C TEMP TEMP NORMAL' is defined by a table:

| TEMP | C TEMP TEMP |
|------|-------------|
| 16 | 728280 |
| 20 | 728280 |
| 100 | 728280 |
| 300 | 728280 |
| 500 | 728280 |
| 800 | 728280 |
| 1200 | 728280 |

The 'Function for K TEMP TEMP LEVEL7' is defined by a table:

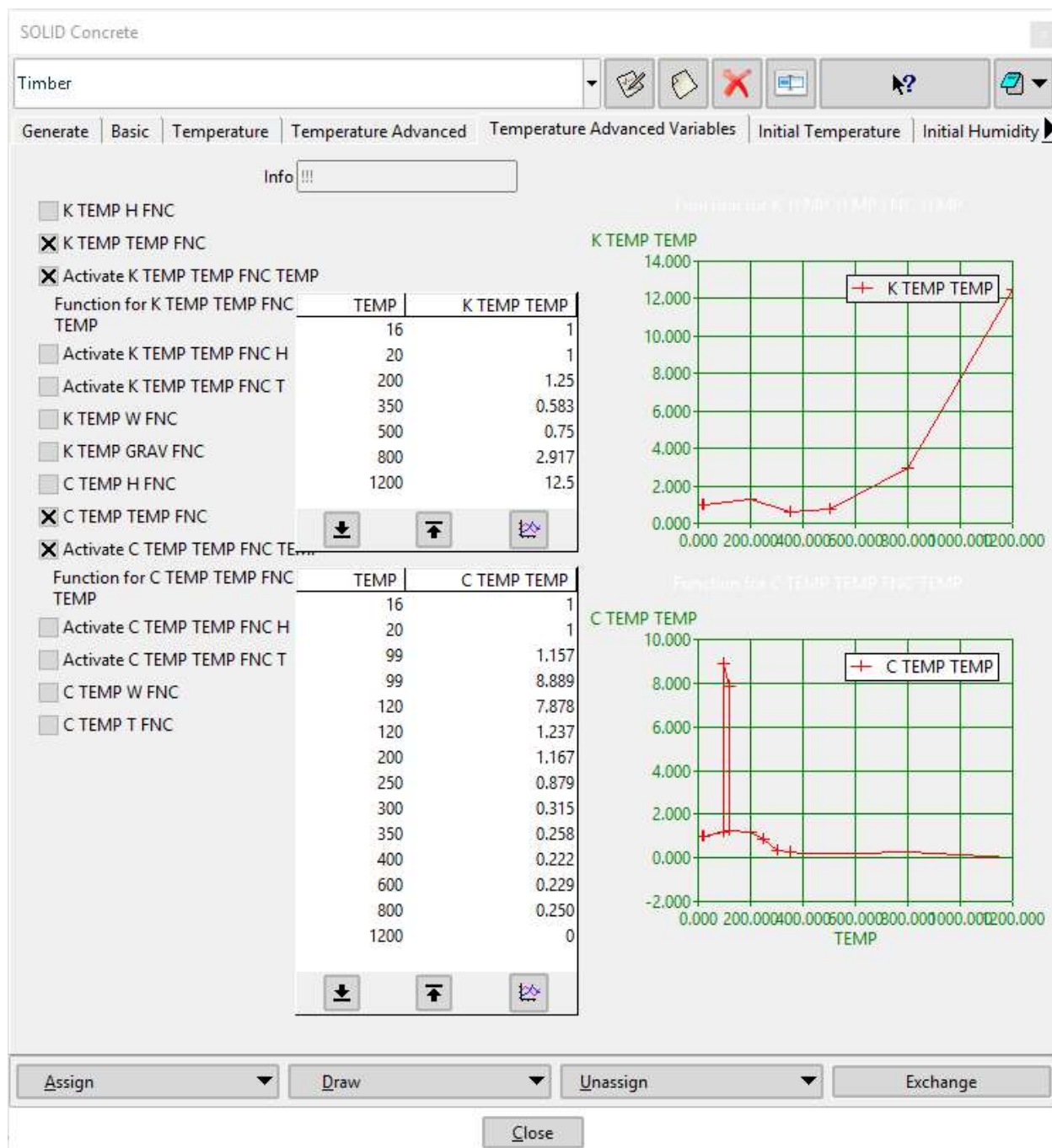
| TEMP | K TEMP TEMP |
|------|-------------|
| 16 | 0 |
| 20 | 0 |
| 100 | 0 |
| 300 | 0 |
| 500 | 0 |
| 800 | 0 |
| 1200 | 0 |

The 'Function for C TEMP TEMP LEVEL7' is defined by a table:

| TEMP | C TEMP TEMP |
|------|-------------|
| 16 | 0 |
| 20 | 0 |
| 100 | 0 |
| 300 | 0 |
| 500 | 0 |
| 800 | 0 |
| 1200 | 0 |

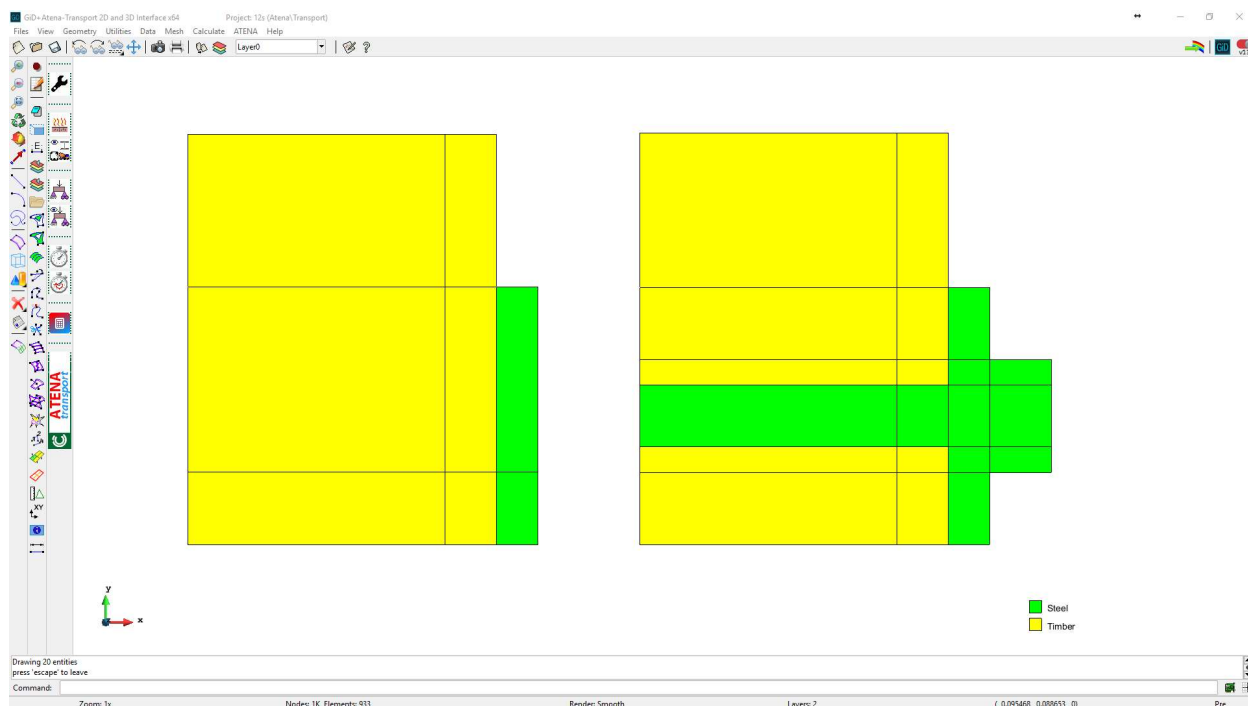
The 'Activate Temperature Advanced' checkbox is checked.

Obr. 52 Vlastnosti dřeva při teplotě 20 °C



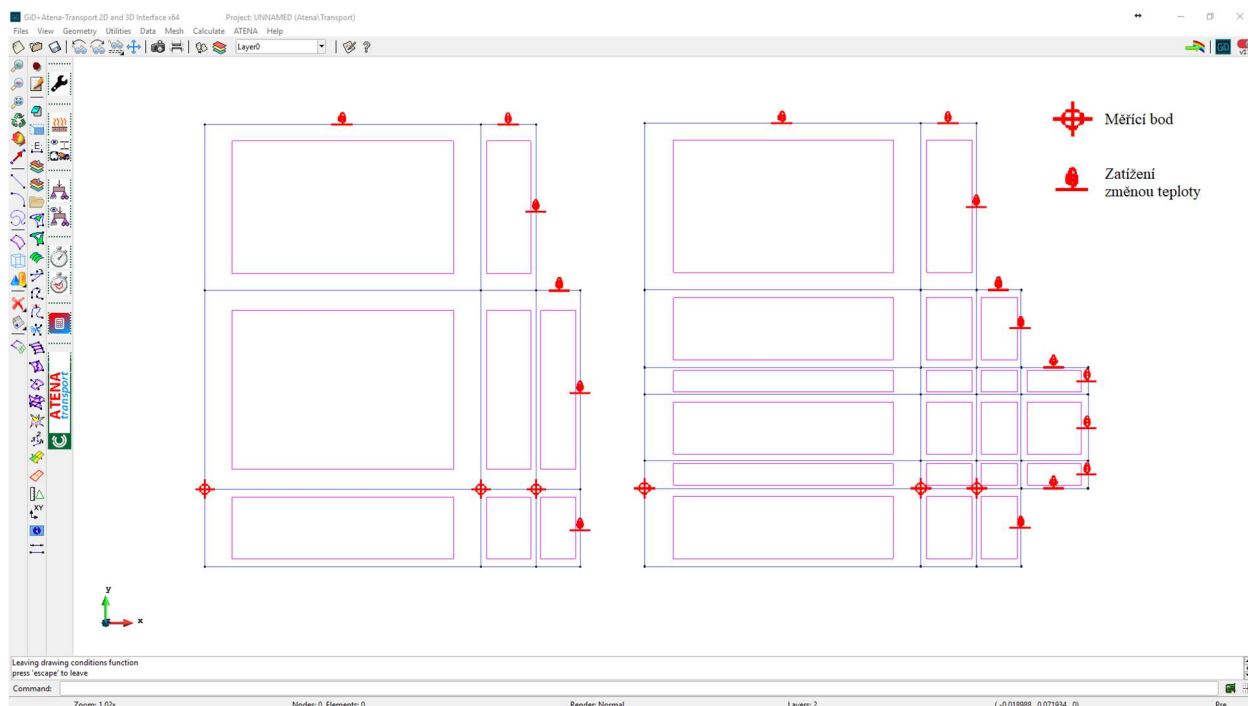
Obr. 53 Nadefinování funkcí součinitele tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity v závislosti na teplotě pro dřevo

Dále se pouze nastaví počáteční teplota dřeva 16,9 °C a materiály lze přiřadit jednotlivým částem průřezu. Materiály byly rozvrženy dle obrázku (Obr. 54). Po přiřazení materiálu do vymodelovaného průřezu je nutné ještě před samotným spuštěním výpočtu umístit měřící body do míst, kde při experimentu byly umístěny termočlánky (Obr. 55). Tyto body budou zaznamenávat teplotu v závislosti na čase.

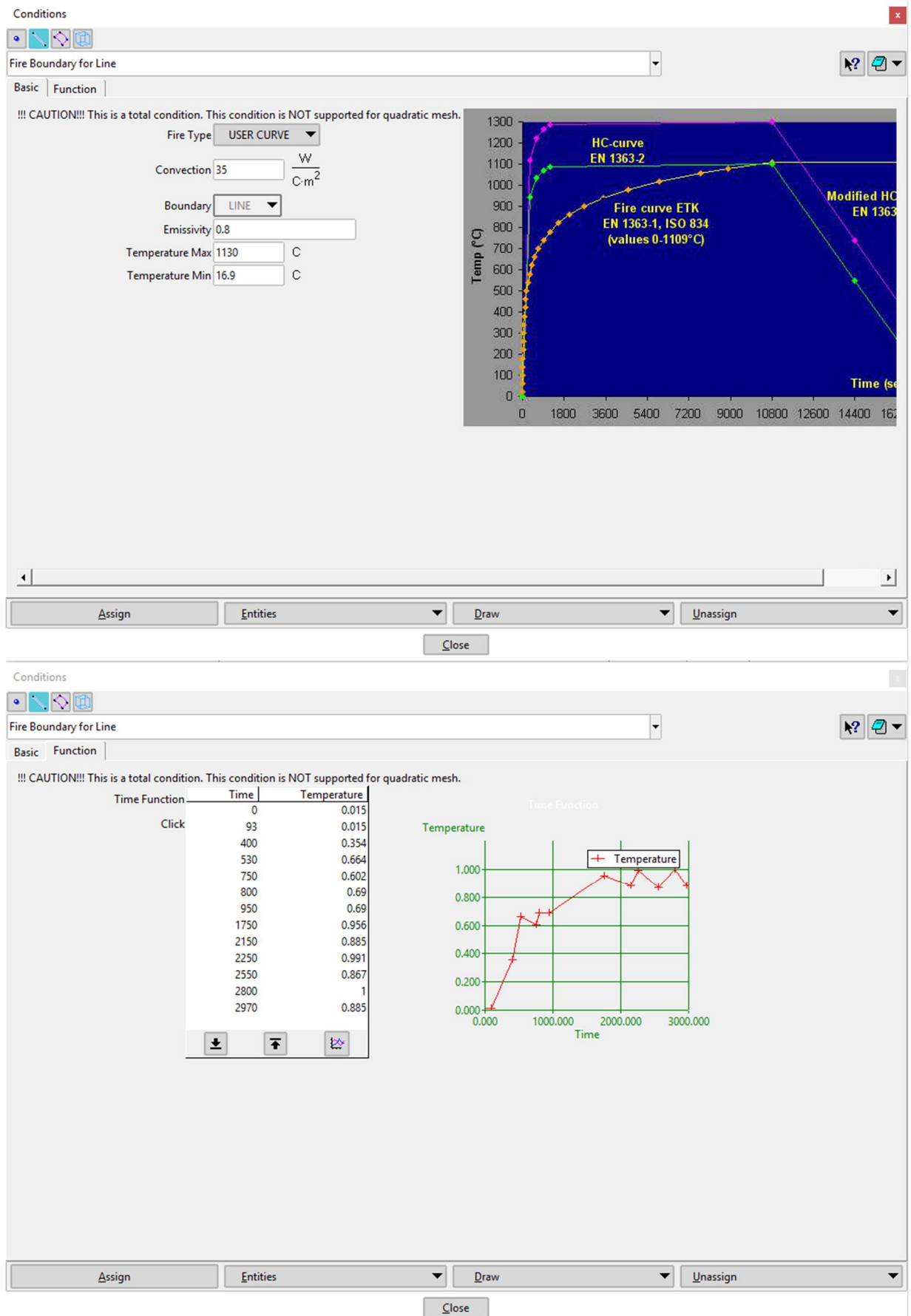


Obr. 54 Rozložení materiálů po průřezu

Po umístění termočlánků bylo zapotřebí definovat teplotní křivku požáru. V prvním případě byla využita teplotní křivka parametrická, dle teplot při požáru změřených během experimentu (Obr. 56). Pro parametrickou křivku se dle ČSN EN 1991-1-2 dosazuje součinitel přestupu tepla konvekcí $\alpha_c = 35 \text{ W / K} \cdot \text{m}^2$ a emisivita $\epsilon = 0,8$. Minimální a maximální teplota byla zvolena dle naměřených teplot při experimentu (max. 1130 °C, min. 16,9 °C)

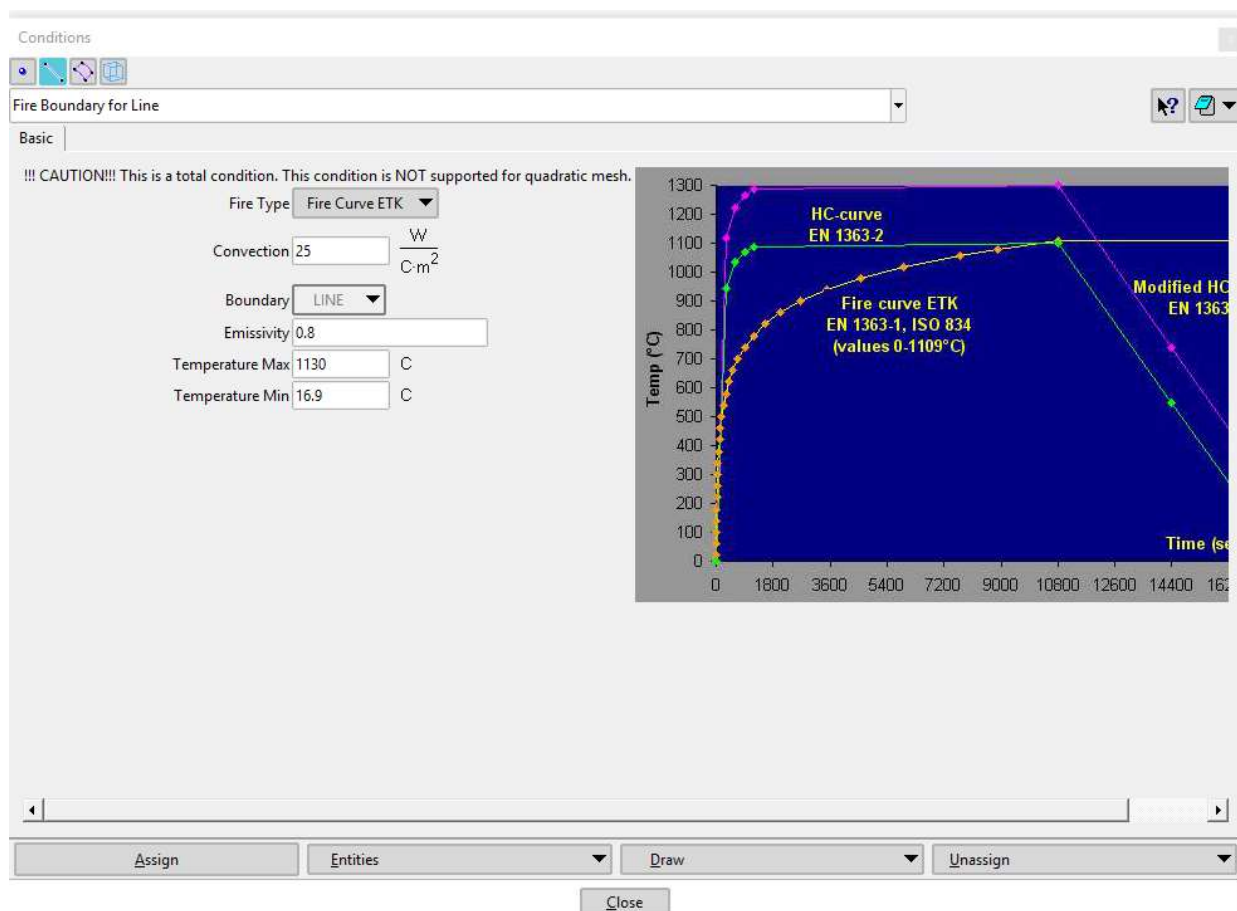


Obr. 55 Poloha měřících bodů a vyznačení částí průřezu zatížených změnou teploty



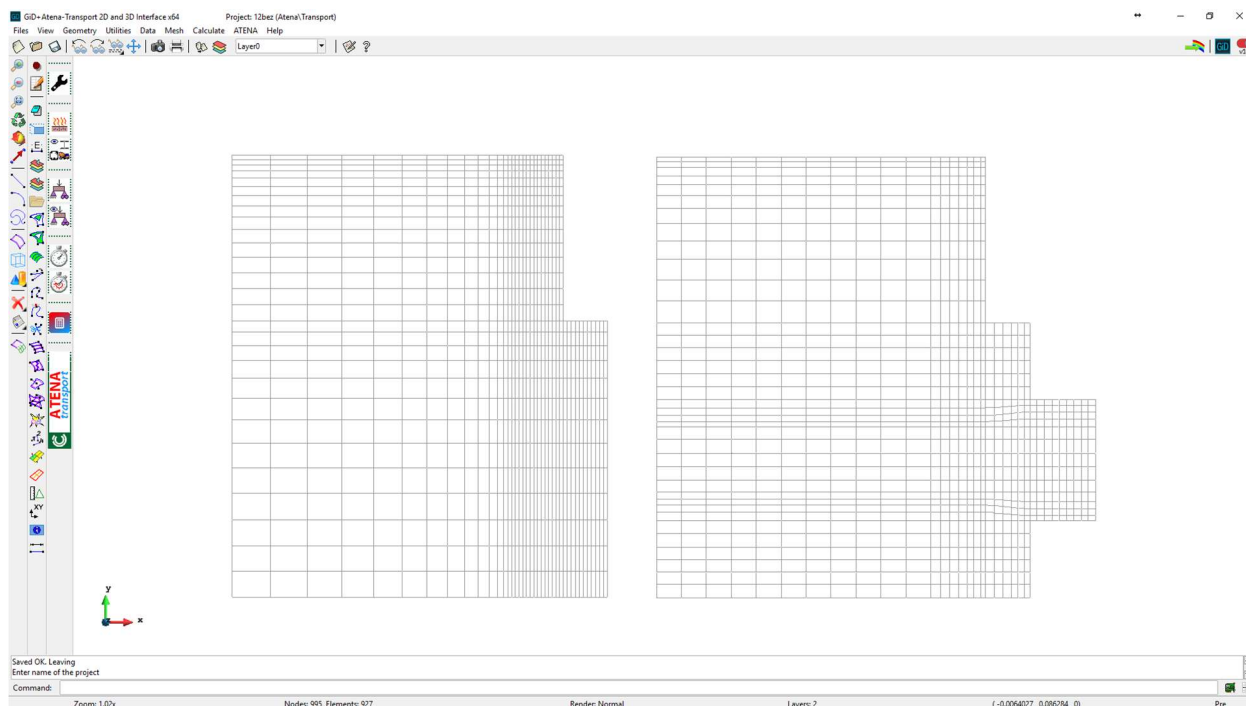
Obr. 56 Definování parametrické teplotní křivky dle experimentu

Pro normovou teplotní křivku se dle ČSN EN 1991-1-2 dosazuje součinitel přestupu tepla konvekcí $\alpha_c = 25 \text{ W / K} \cdot \text{m}^2$ a emisivita $\varepsilon = 0,8$. Minimální teplota byla zvolena dle naměřených teplot při experimentu $16,9^\circ\text{C}$ (Obr. 57).



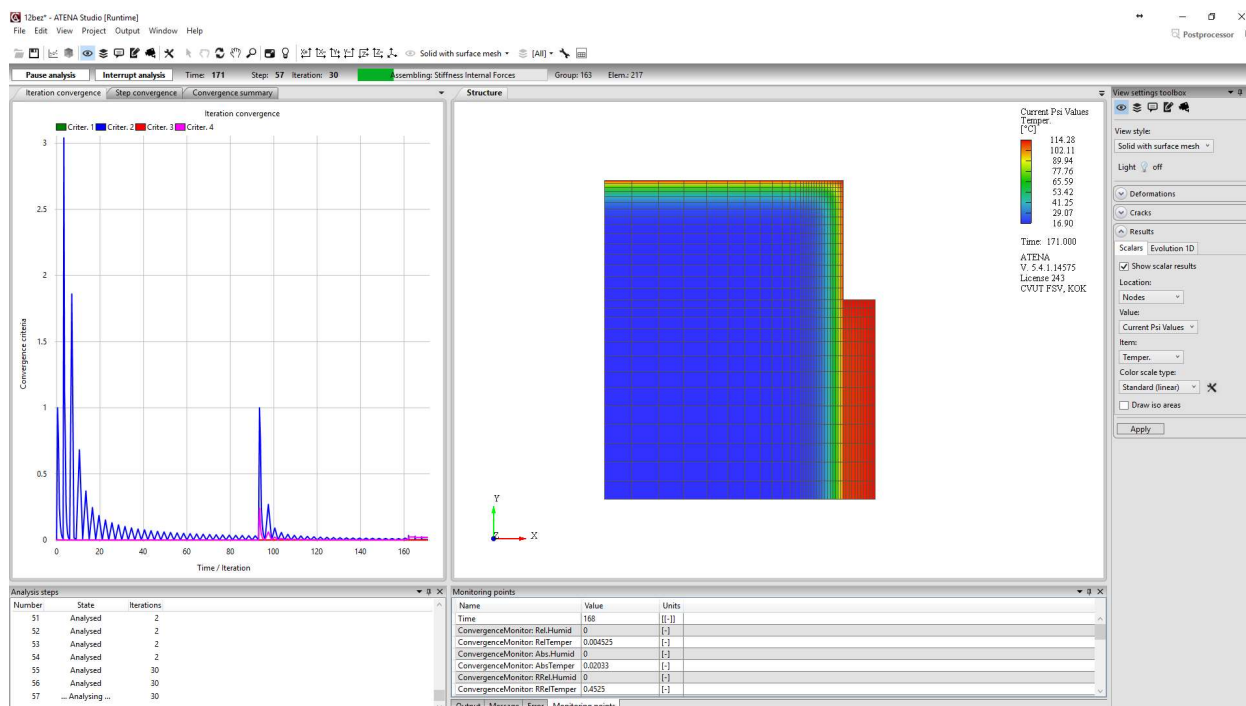
Obr. 57 Definování normové teplotní křivky

Po umístění všech termočlánků a nadefinování požárního zatížení bylo možné vytvořit početní síť pro metodu koncových prvků (tzv. *mesh*). Z důvodu omezeného počtu výpočetních ploch sítě ve studentské verzi GiD bylo nutné modelovat pouze symetrickou část průřezu, aby byl výpočet co nejpresnější. Vytvořená početní síť je znázorněna na obrázku (Obr. 58). Pro zpřesnění výpočtu je síť v krajních místech průřezu zesílená.



Obr. 58 Vytvořená výpočetní síť (mesh)

Po vytvoření sítě bylo už před samotným výpočtem nutno pouze nastavit časové kroky výpočtů. Bylo nastaveno 1 200 kroků po 3 s. Výpočet je ukončen po dosažení času 3 600 s. Nyní bylo možné opustit software GiD a spustit výpočet v procesoru Atena (Obr. 59).

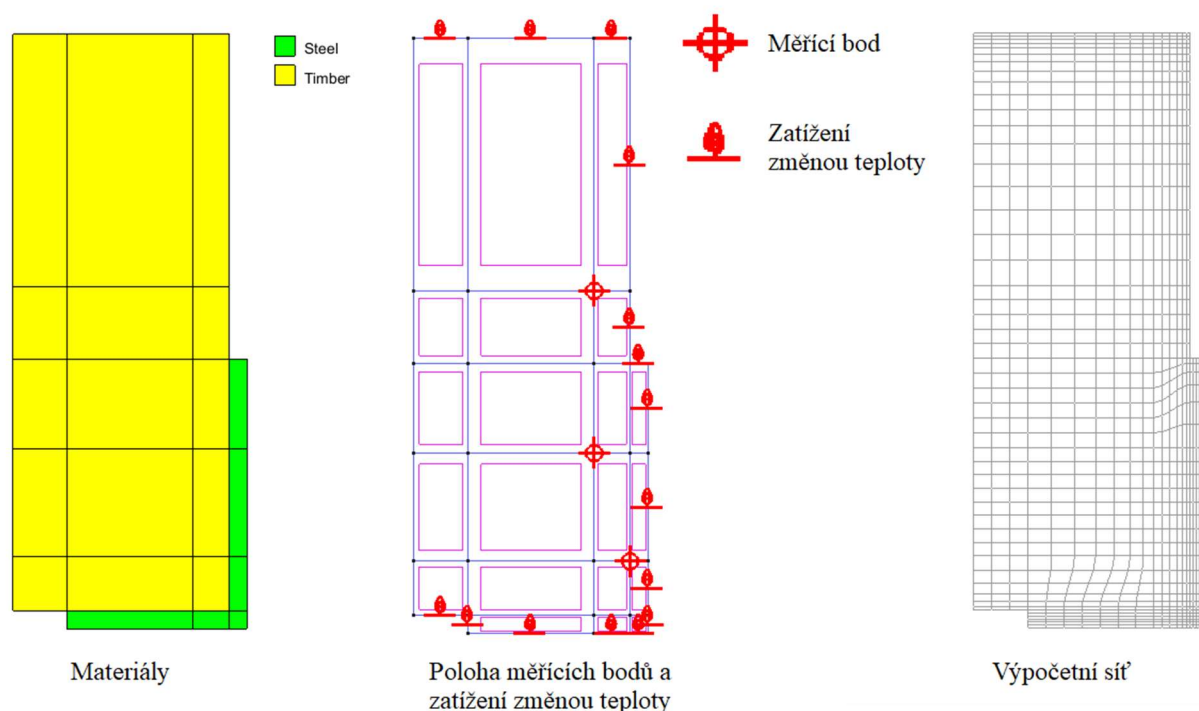


Obr. 59 Výpočet v softwaru Atena

Výsledky z posouzení spoje s ocelovými příložkami programem Atena jsou rozebrány v následující kapitole 5.4.3

5.4.2 Postup výpočtu pro spoj pomocí ocelových L-profilů

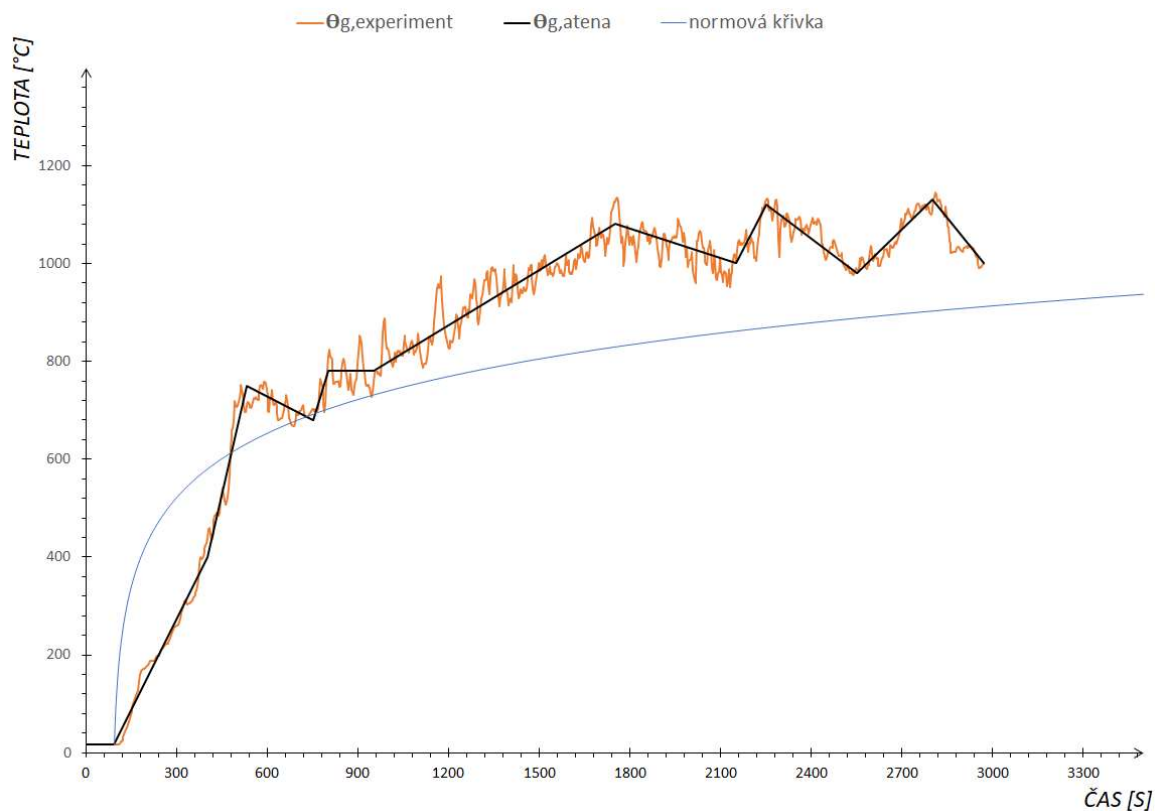
V této kapitole se budeme zabývat druhým typem spoje, což je spoj pomocí dvou ocelových L-profilů vlepených k experimentálnímu trámu. Postup výpočtu a zadávání vstupních dat do softwaru GiD byl řešen v kapitole 5.4.1. V tomto případě je postup obdobný. Na následujících obrázcích můžeme vidět rozdělení materiálu v průřezu, umístění termočlánků a požárního zatížení na části průřezu experimentálního trámu a také rozvržení početní sítě (*mesh*) (Obr. 60). Výsledky budou porovnány v kapitole 5.4.3.



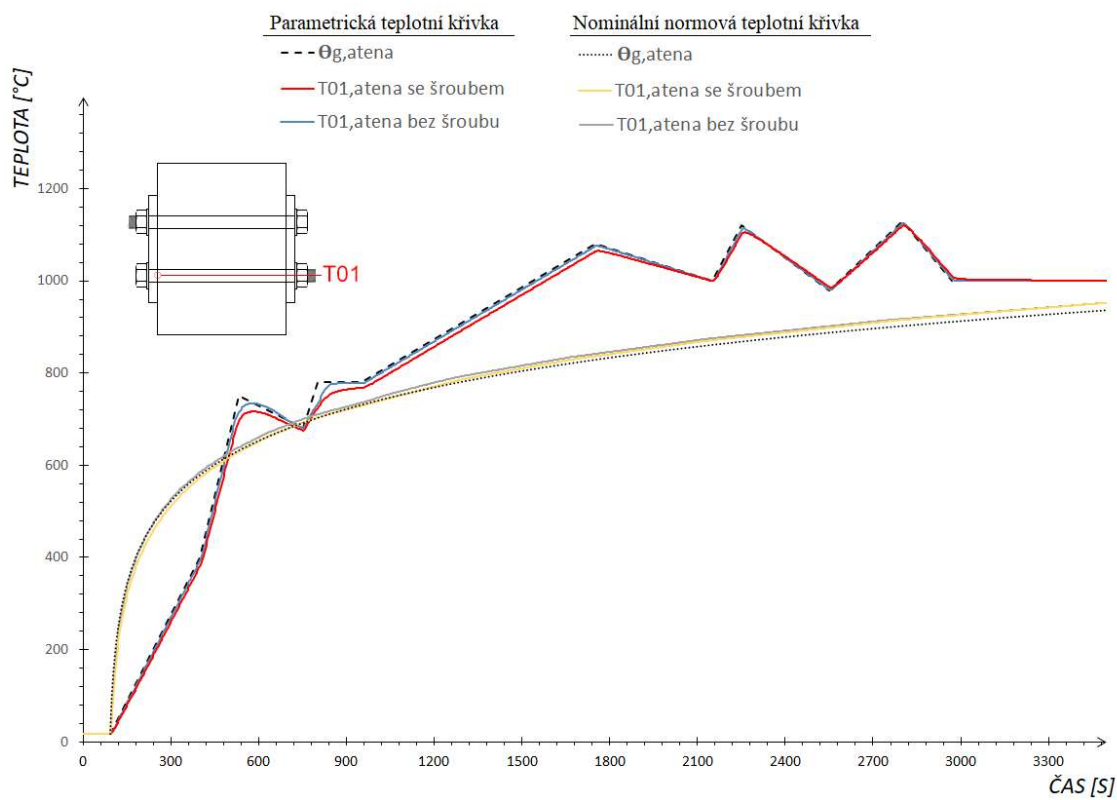
Obr. 60 Model průřezu se spojem s dvěma L-profilů v softwaru GiD

5.4.3 Výsledky z teplotní analýzy softwarem Atena

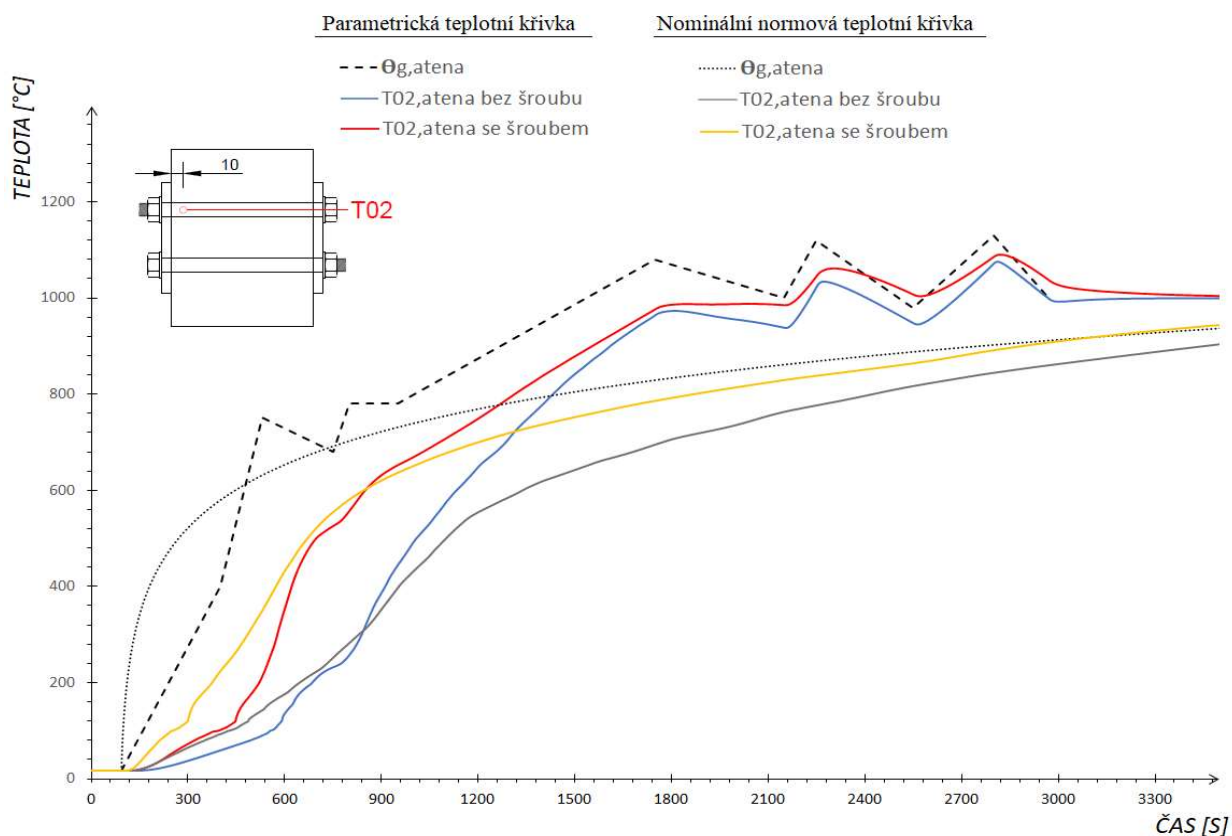
Výsledky z teplotní analýzy softwarem Atena jsou zaznamenány do grafů, kde jsou vyznačeny polohy termočlánků a teploty na nich zaznamenané v závislosti na čase (Graf 17 - Graf 22). Na grafu (Graf 16) jsou vyznačeny teplotní křivky, které byly použity v softwarovém modelu. Nominální normová teplotní křivka a zjednodušená parametrická teplotní křivka, která reprezentuje křivku teploty plynu zaznamenanou při velkorozměrové požární zkoušce. Dále se grafům více věnuje kapitola 5.5.



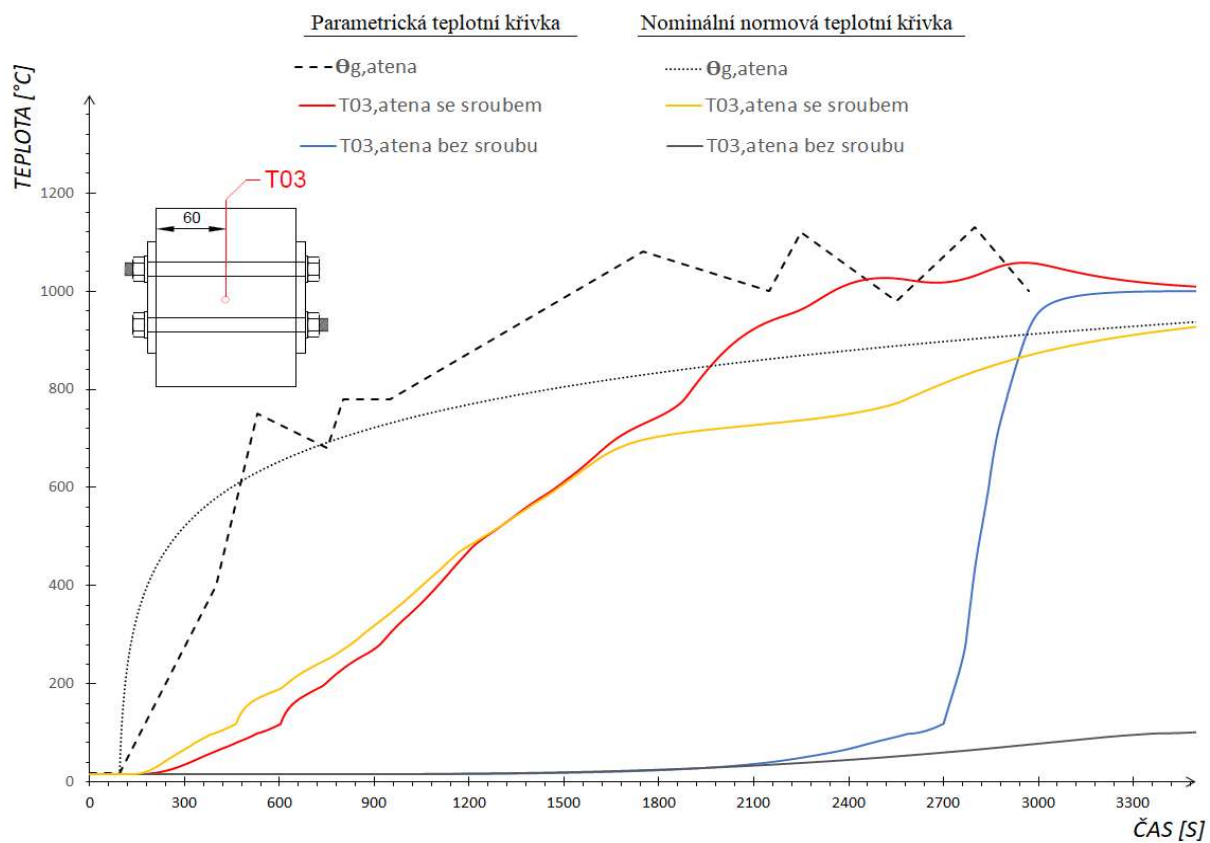
Graf 16 Teplota plynu při experimentu vs. teplota plynu zadávaná do softwaru



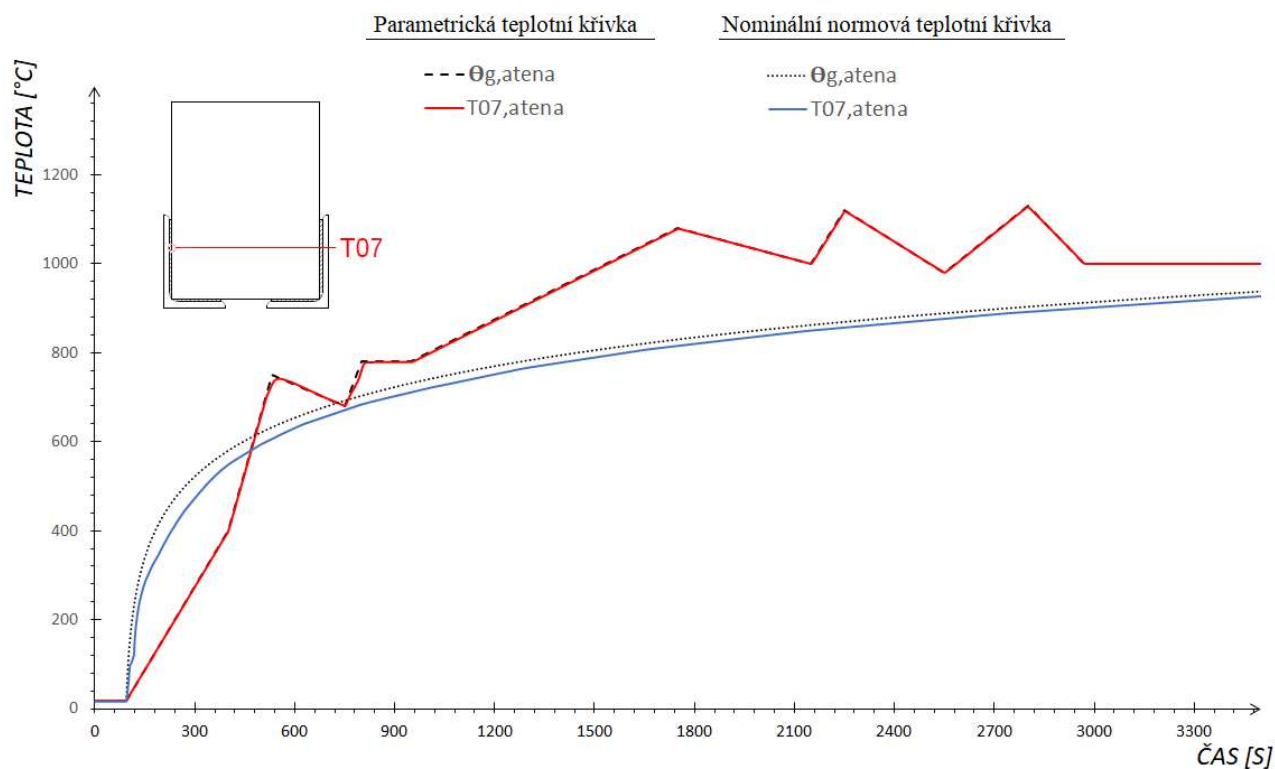
Graf 17 Teplota termočlánu 1 v závislosti na čase (data výpočet Atena)



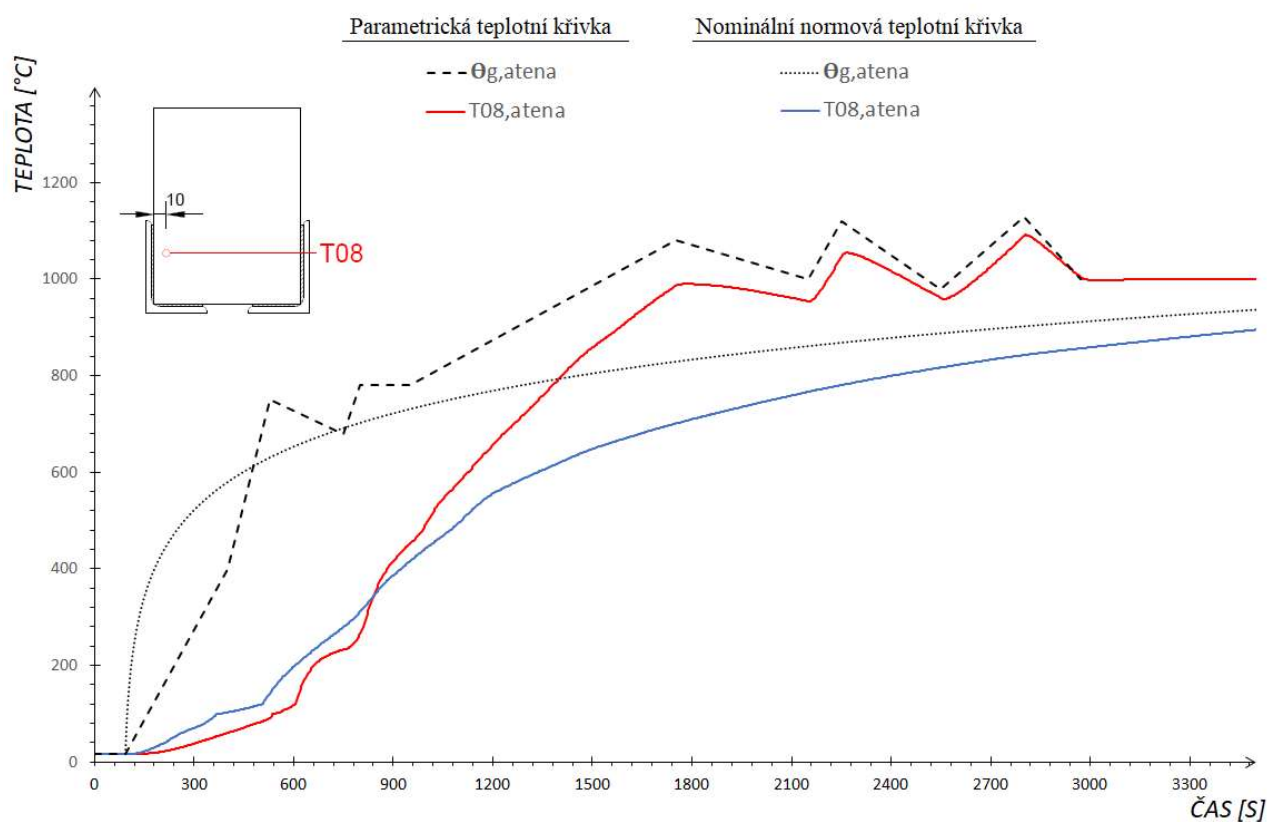
Graf 18 Teplota termočlánku 2 v závislosti na čase (data výpočet Atena)



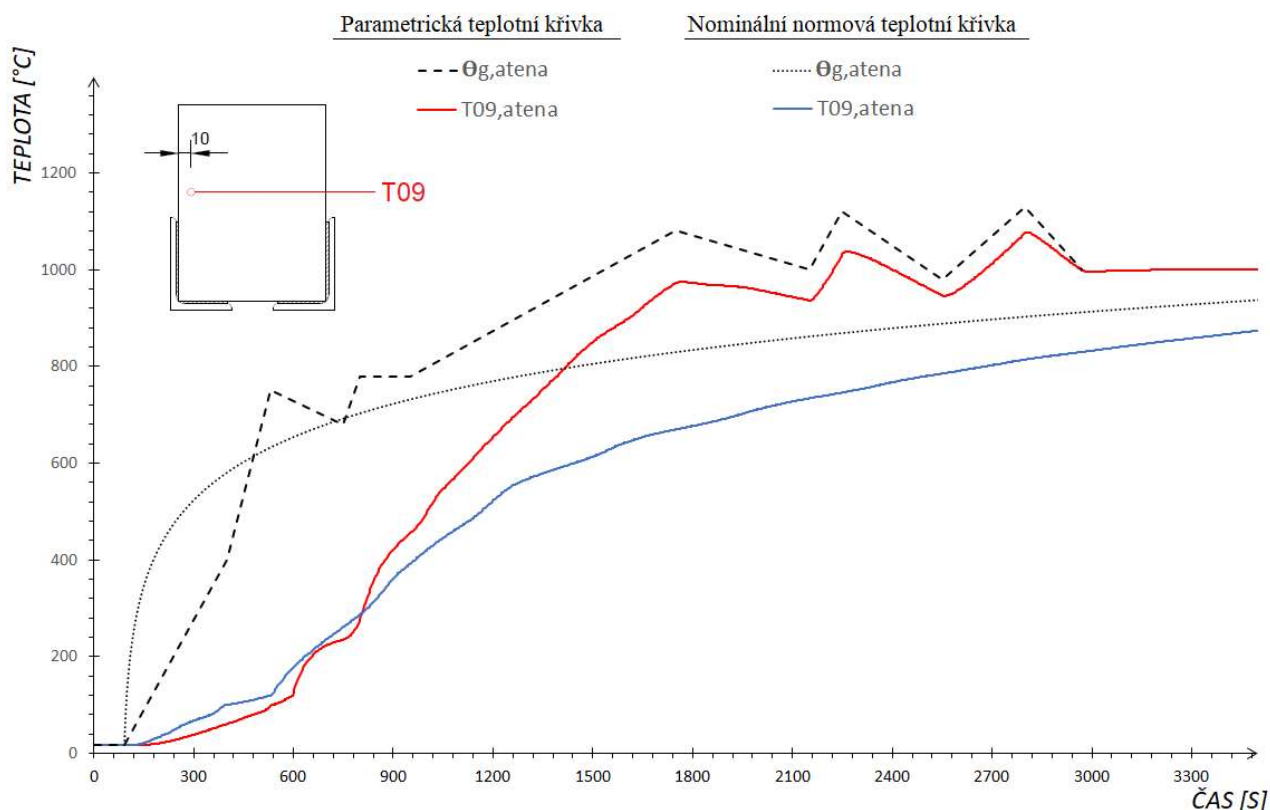
Graf 19 Teplota termočlánku 3 v závislosti na čase (data výpočet Atena)



Graf 20 Teplota termočlánku 7 v závislosti na čase (data výpočet Atena)



Graf 21 Teplota termočlánku 8 v závislosti na čase (data výpočet Atena)



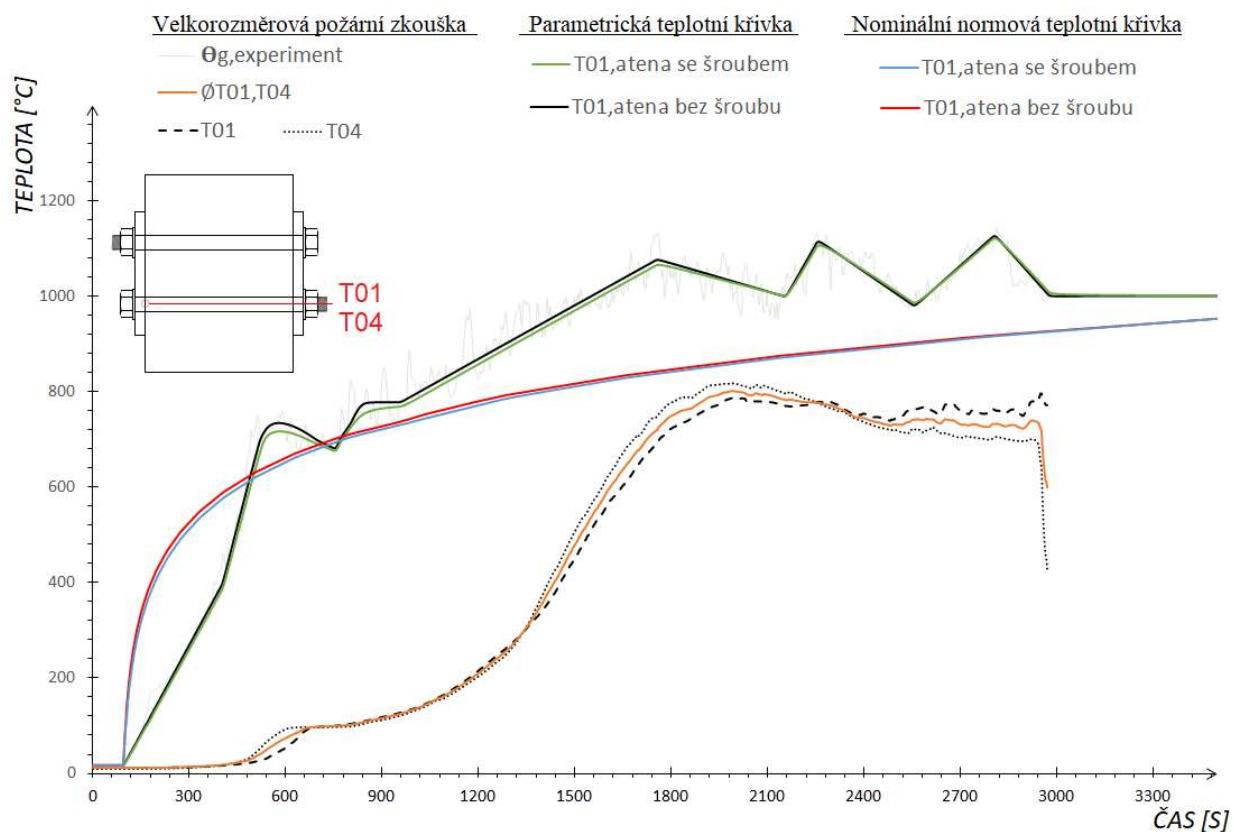
Graf 22 Teplota termočlánku 9 v závislosti na čase (data výpočet Atena)

5.5 Porovnání výsledků z velkorozměrové požární zkoušky s výsledky z modelových metod

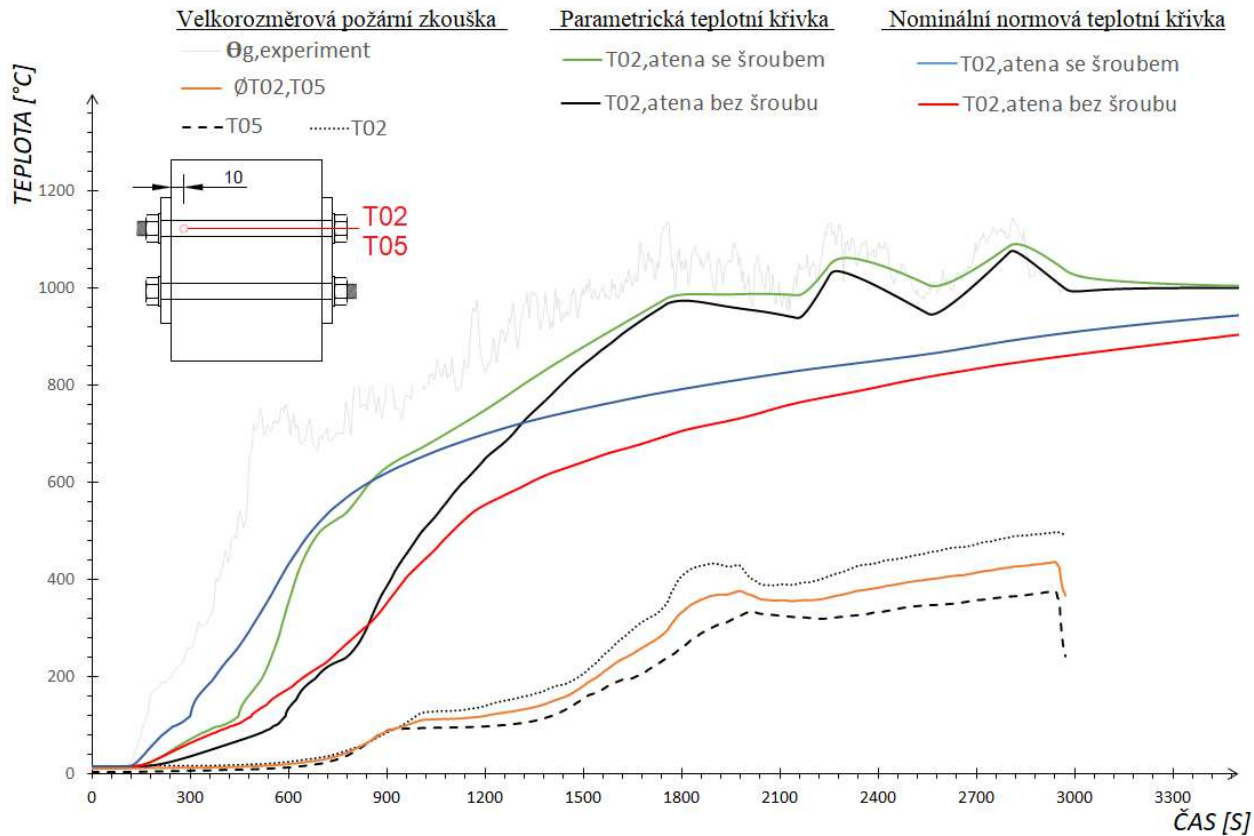
V této kapitole jsme se zabývali porovnáním jednotlivých početních metod s velkorozměrovou požární zkouškou a následně samotným porovnáním modelových metod mezi sebou. Jelikož numerické výpočtové metody dle ČSN EN 1995-1-2 jsou založeny na nominální normové teplotní křivce, nejsou při porovnání s velkorozměrovou požární zkouškou zcela vhodné. Naproti tomu do softwaru Atena byla vložena i parametrická teplotní křivka sestavená dle rozvoje teploty plynu zaznamenaného při velkorozměrové požární zkoušce.

5.5.1 Porovnání velkorozměrové požární zkoušky se softwarem Atena

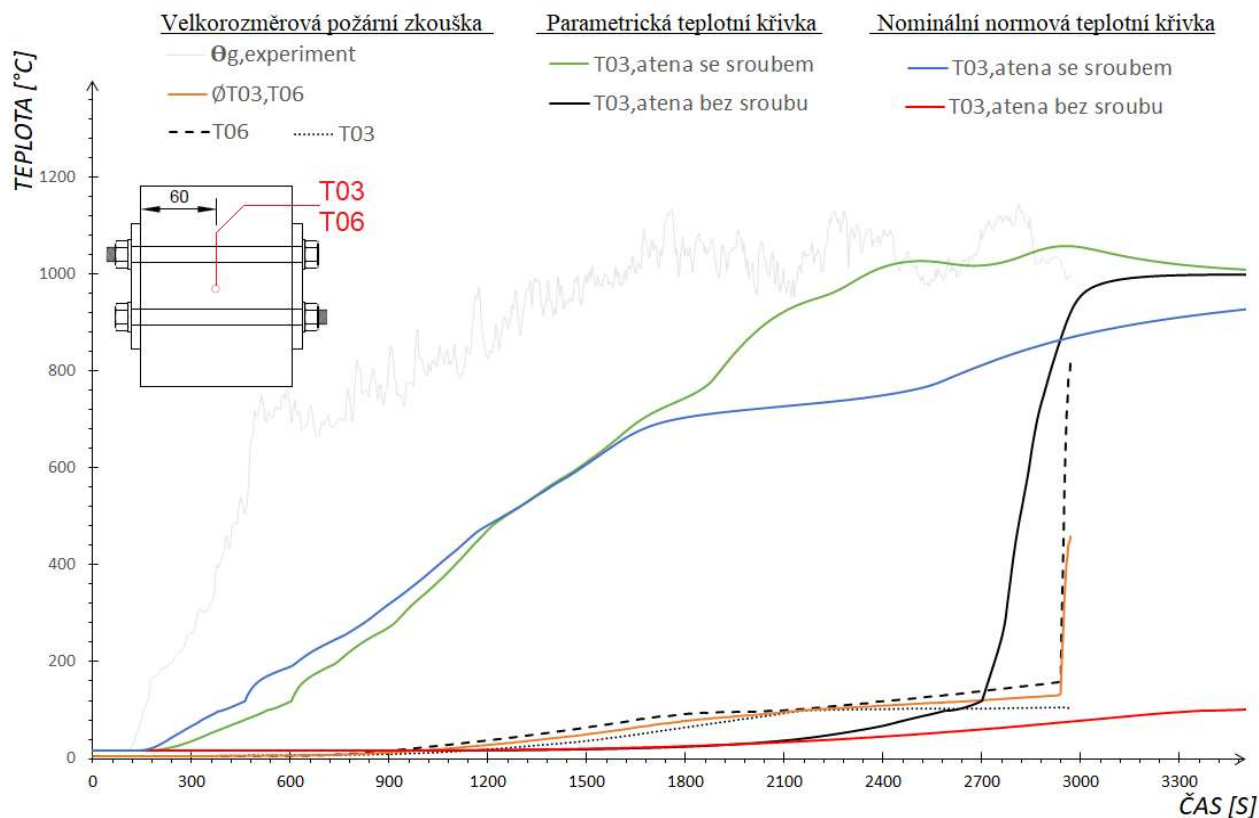
V prvním případě jsme se zabývali porovnáním výpočtů softwaru Atena s výsledky dle požárního experimentu. Na grafech (Graf 23 - Graf 28) jsou zaznamenány jak data ze zatížení nominální normovou křivkou, tak data se zatížením parametrickou křivkou požáru. U grafů, kde byla měřena teplota dřevěného prvku je viditelný pozvolný nárůst teploty do 100 °C, kde se začíná vypařovat voda obsažená v experimentálních trámech. Tato teplota zůstává nějakou dobu konstantní, dokud se neodpaří většina vody v trámech a následně prudce stoupne (kap.4.3).



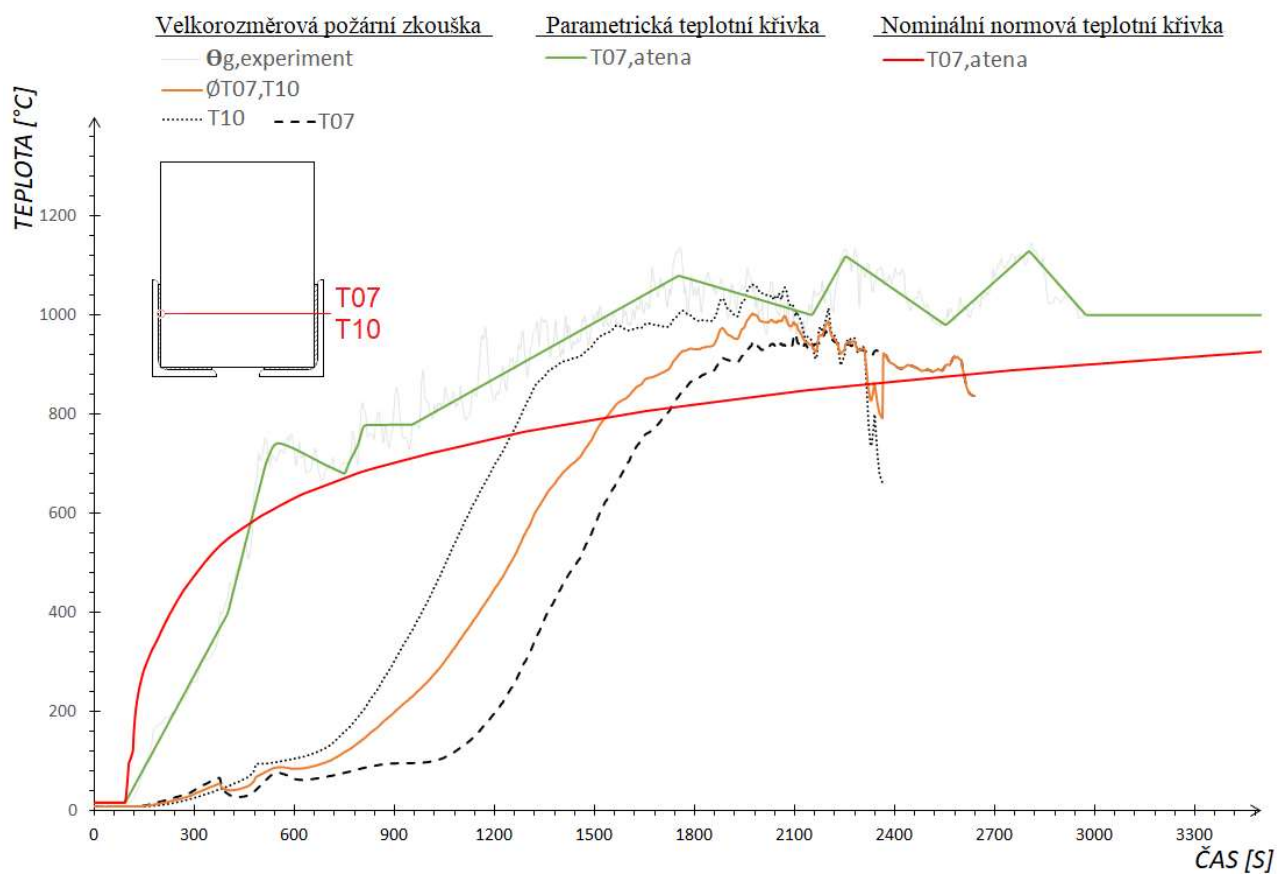
Graf 23 Porovnání teplot na termočláncu 1 a 4 na experimentálním tramu 1,2



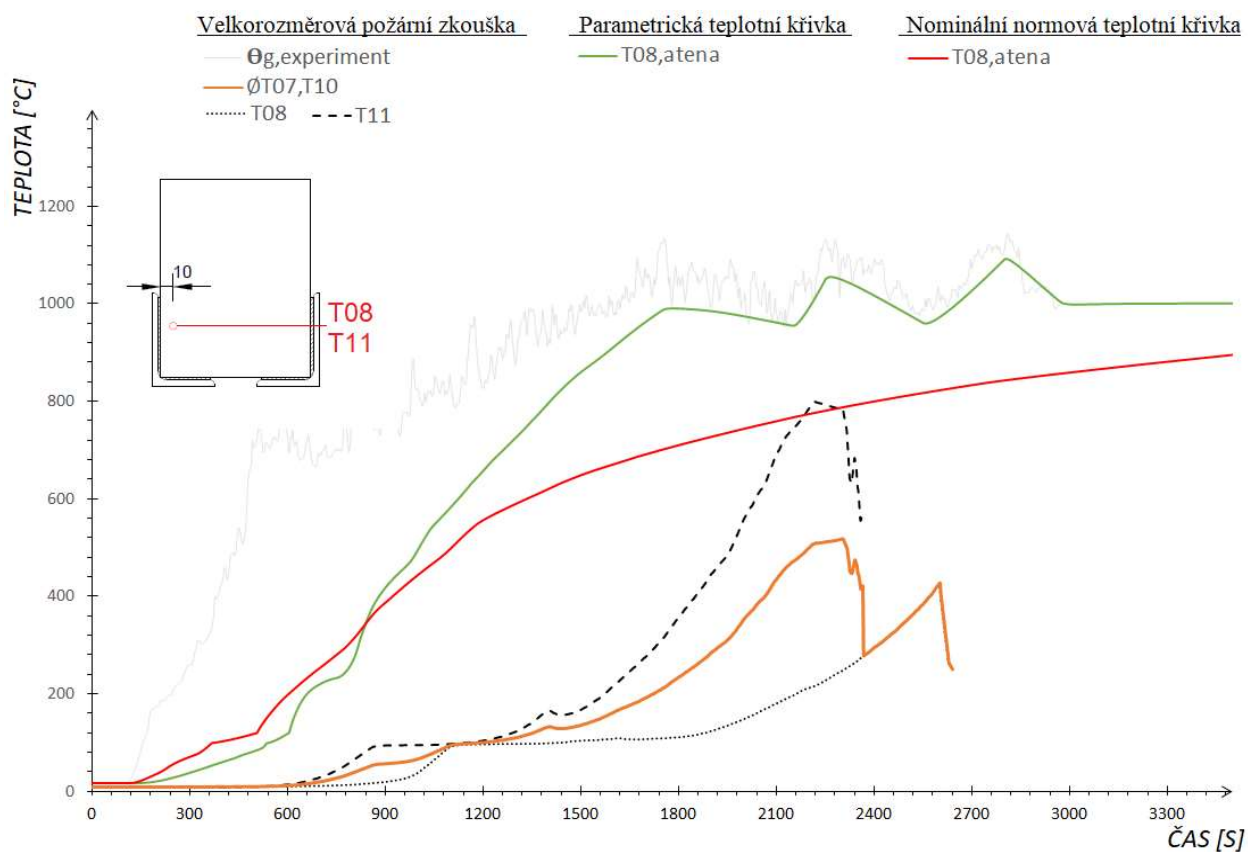
Graf 24 Porovnání teplot na termočláncu 2 a 5 na experimentálním tramu 1,2



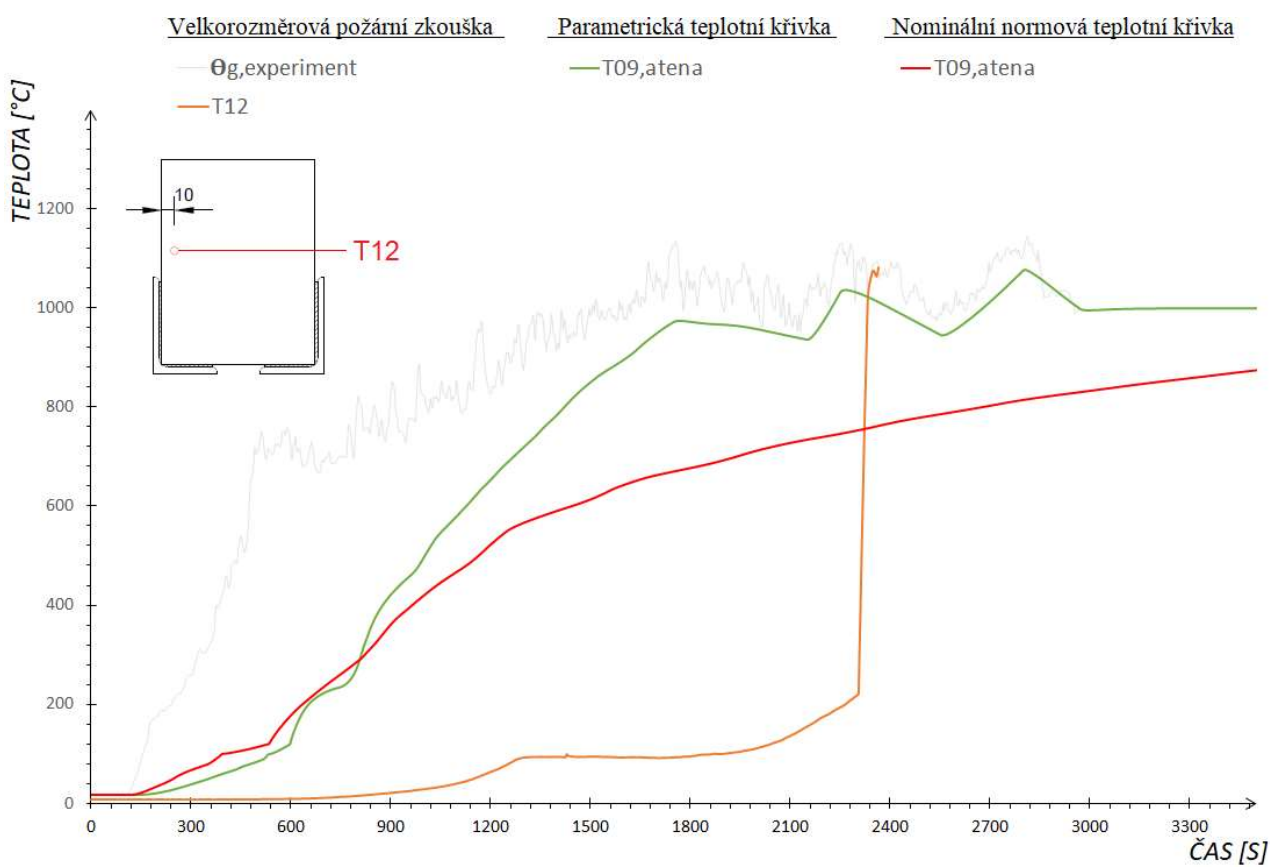
Graf 25 Porovnání teplot na termočláncu 3 a 6 na experimentálním tramu 1,2



Graf 26 Porovnání teplot na termočláncu 7 a 10 na experimentálním tramu 3,4



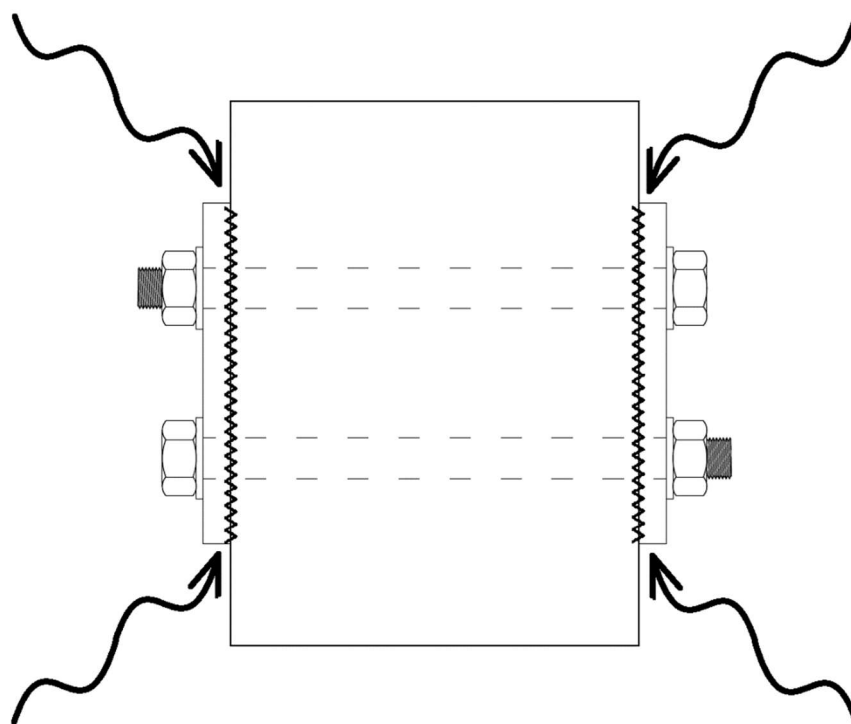
Graf 27 Porovnání teplot na termočláncu 8 a 11 na experimentálním tramu 3,4



Graf 28 Porovnání teplot na termočláncu 12 na experimentálním tramu 4

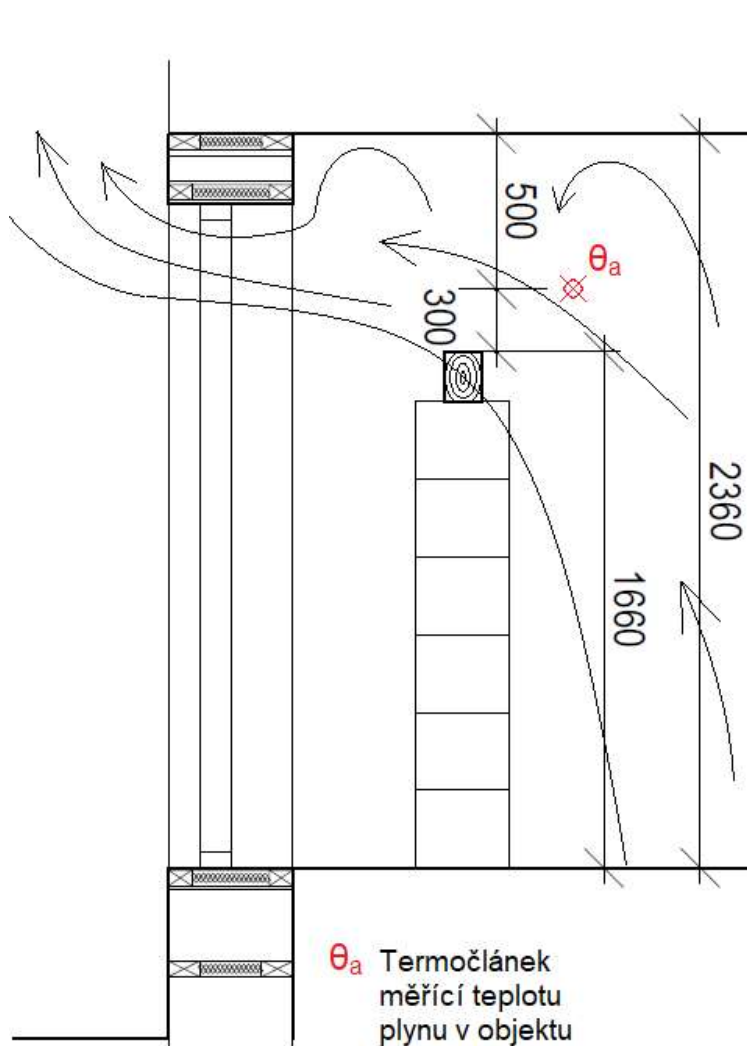
Z grafů je patrné, že výsledná data z velkorozměrové požární zkoušky a z analýzy softwarem Atena jsou velice odlišné. Data získaná z experimentu vykazují zdaleka nižší hodnoty teploty nežli data získaná z tepelné analýzy softwarem Atena. Tuto skutečnost jsme se pokusili vysvětlit třemi teoriemi:

- během experimentu dochází k *ochlazování hlav termočlánků* v místech přechodu materiálů vlivem proudění chladnějšího vzduchu do prostoru mezi materiály, který se vlivem tepelné roztažnosti materiálů vytvořil (Obr. 61);



Obr. 61 Ochlazování prostoru mezi materiály

- *nekonstantními tepelnými podmínkami*, které vznikají v prostoru s velkorozměrovou požární zkouškou vlivem dynamiky proudění vzduchu. Tepelná analýza v softwaru Atena počítá s ideálními podmínkami a rovnoměrným zatížením celého experimentálního trámu stejnou teplotní křivkou. Pro účely porovnání teplotní analýzy softwaru s požárním experimentem lépe slouží požární zkouška prováděná v peci, kde lze zajistit shodná vstupní data do požárního experimentu a počítačové teplotní analýzy. Avšak velkorozměrová požární zkouška provedená na reálném objektu přináší hodnotnější informace o chování požárů a obraně proti němu;
- *vlivem stavebních otvorů* v experimentálním objektu. Tato teorie spíše rozvíjí teorii s nekonstantními tepelnými podmínkami. Termočlánky zaznamenávající teplotu plynu v objektu, které byly umístěny 0,5 m pod stropem, byly ohřívány vyšší teplotou nežli termočlánky v experimentálních trámech, které se nacházeli níže. (Obr. 62)

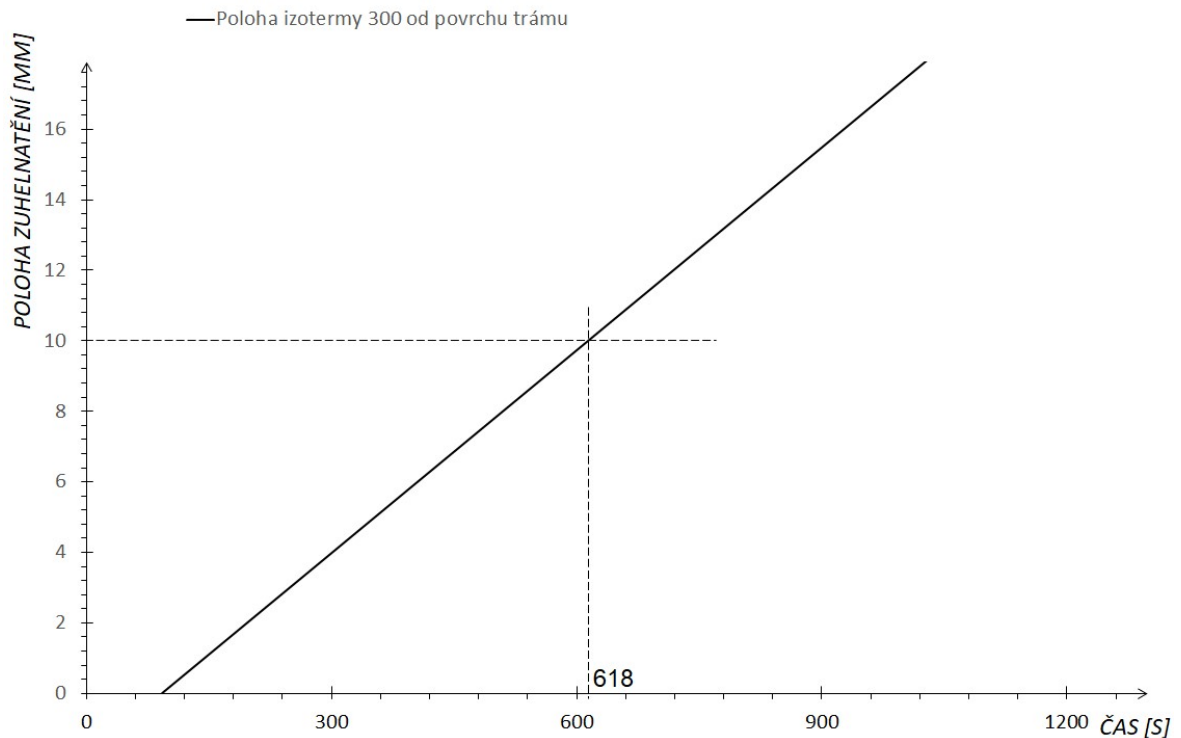


Obr. 62 Řez objektem s vyznačením proudění horkých plynů vlivem stavebních otvorů

5.5.2 Porovnání velkorozměrové požární zkoušky s analytickým výpočtem

V této kapitole budeme porovnávat výsledky z velkorozměrové požární zkoušky s analytickým výpočtem, který byl proveden dle ČSN EN 1995-1-2. Tento výpočet je založen na nominální normové teplotní křivce a nebere ohled na ocelové spojovací prostředky. Výsledné hodnoty z analytického výpočtu (kap.5.3.2) a velkorozměrové požární zkoušky (kap.5.2.4) jsou zapracovány do grafů a porovnány časy, kdy termočlánek vzdálený 10 mm pod povrchem dřevěného trámu dosáhl polohy 300° *Izotermy*³. V případě grafu (Graf 29) je počátek požáru posunut o 93 s z důvodu stejného počátku nárůstu teploty při velkorozměrové požární zkoušce.

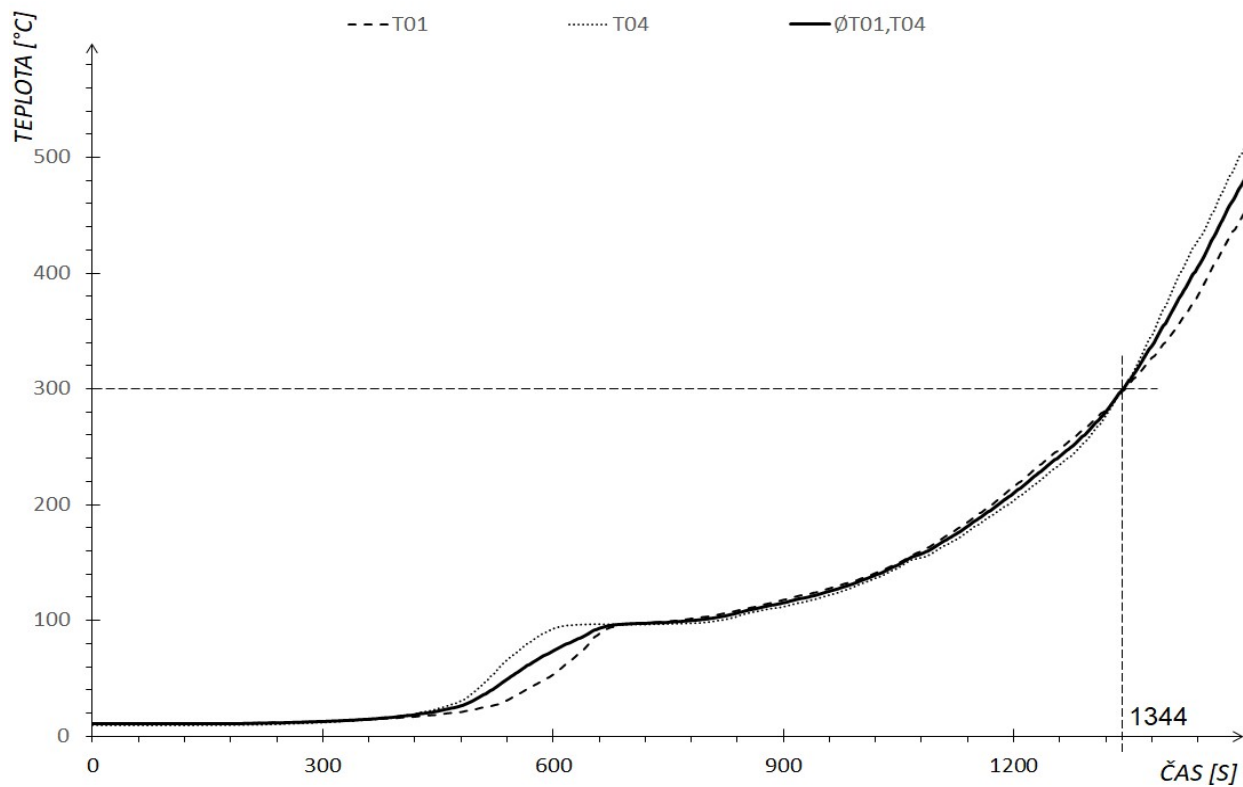
³ **300° Izoterma** – pomyslná čára ohraničující část průřezu s teplotou nižší než 300 °C, kde je pevnost materiálu uvažovaná dle ČSN EN 1995-1-2 stejná jako za běžné teploty



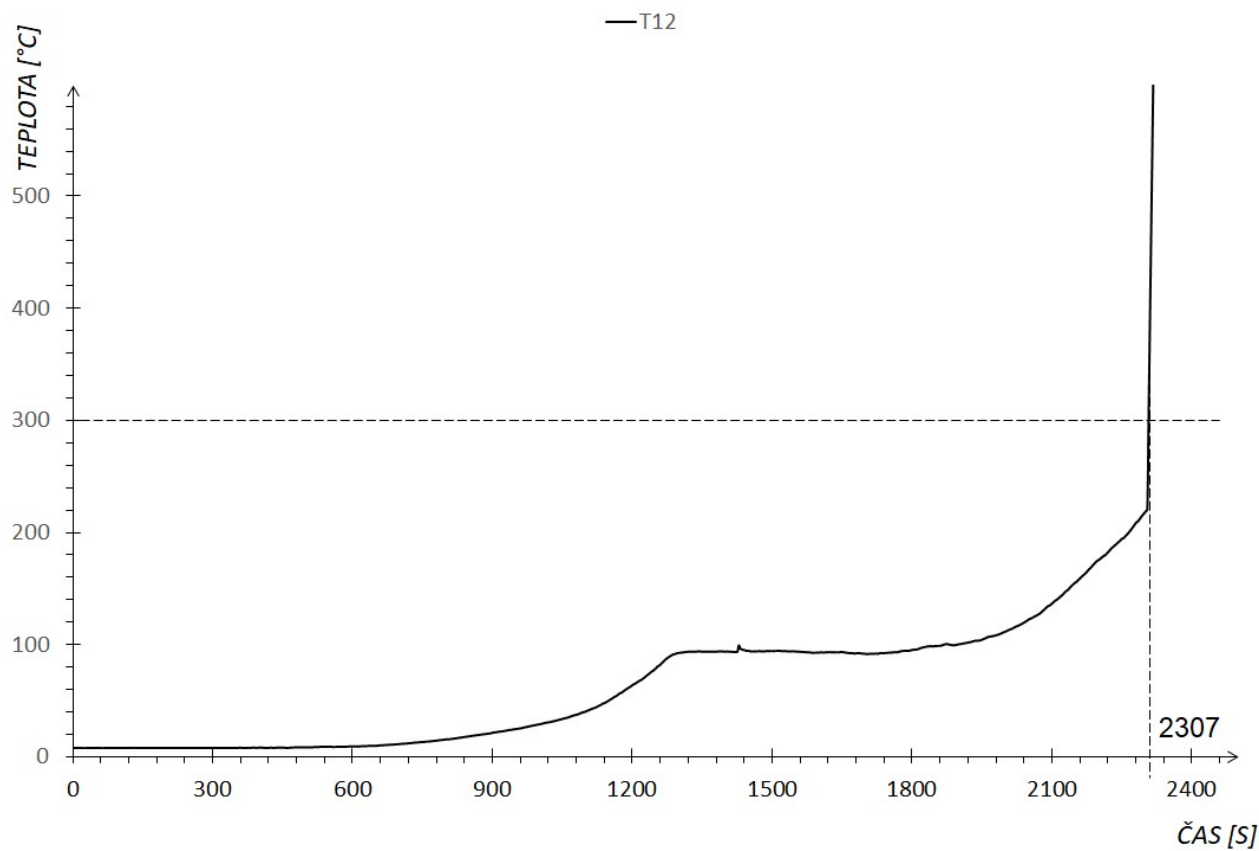
Graf 29 Závislost hloubky zuhelnatění na čase

Z grafu (Graf 29) je patrné, že teplota termočlánku v hloubce 10 mm pod povrchem vystoupá na 300 °C po 618 s. Oproti naměřené teplotě 300 °C z velkorozměrové požární zkoušky (Graf 30), kde tato teplota dosáhne hloubky 10 mm pod povrchem průřezu až po 1 344 s, je tento model na straně bezpečnosti. Musíme ale brát ohled na to, že analyticky vypočtený model je zatížen dle nominální normové teplotní křivky a nepočítá s ocelovými příložkami. Rozdíly časových hodnot lze vysvětlit i teoriemi v kapitole 5.5.1.

Pro porovnání bez ocelových přílohek lépe poslouží druhý typ experimentálního trámu, kde byl umístěn termočlánek 10 mm pod povrch průřezu mimo ocelovou část spoje. Tento termočlánek vykazuje dle grafu (Graf 31) teplotu 300 °C až po 2307 s, což naznačuje chybné měření termočlánku číslo 12. Chybné měření mohlo také být způsobeno mechanickým poškozením termočlánku nebo jeho vysunutím z dané pozice při odpadávání částí podhledu během požáru.



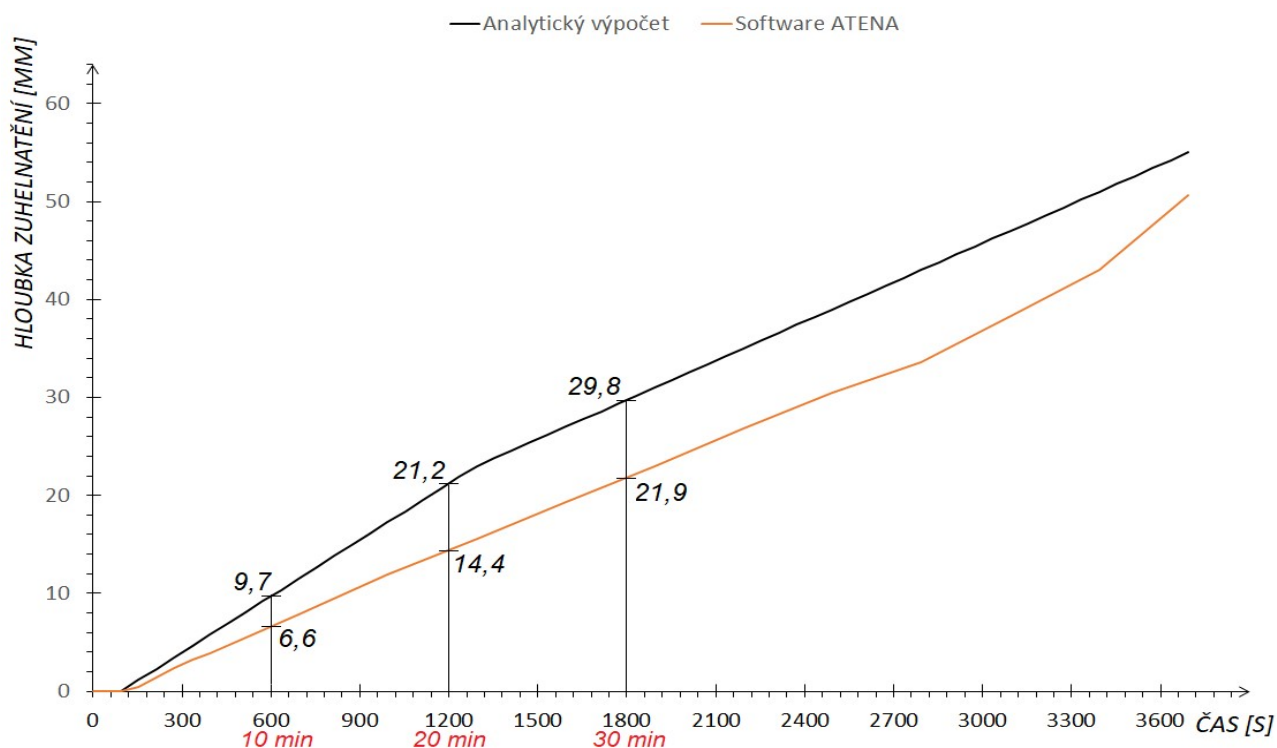
Graf 30 Naměřená teplota termočlánku 1 a 4 na experimentálním trámu 1,2



Graf 31 Naměřená teplota na termočlánku 12 na experimentálním trámu 4

5.5.3 Porovnání analytického výpočtu se softwarem Atena

Poslední typ srovnávání výpočtů je porovnání numerického modelu analytickým výpočtem se softwarem Atena. K tomuto posouzení byly výsledky z analytického výpočtu graficky zpracovány pomocí softwaru AutoCAD s vyznačením polohy 300° izothermy. Tyto grafické výstupy v daných časových bodech byly porovnány. Z důvodu přesnějšího srovnání výstupů z modelových metod byly porovnány pouze průřezy zatížené nominální normovou křivkou.



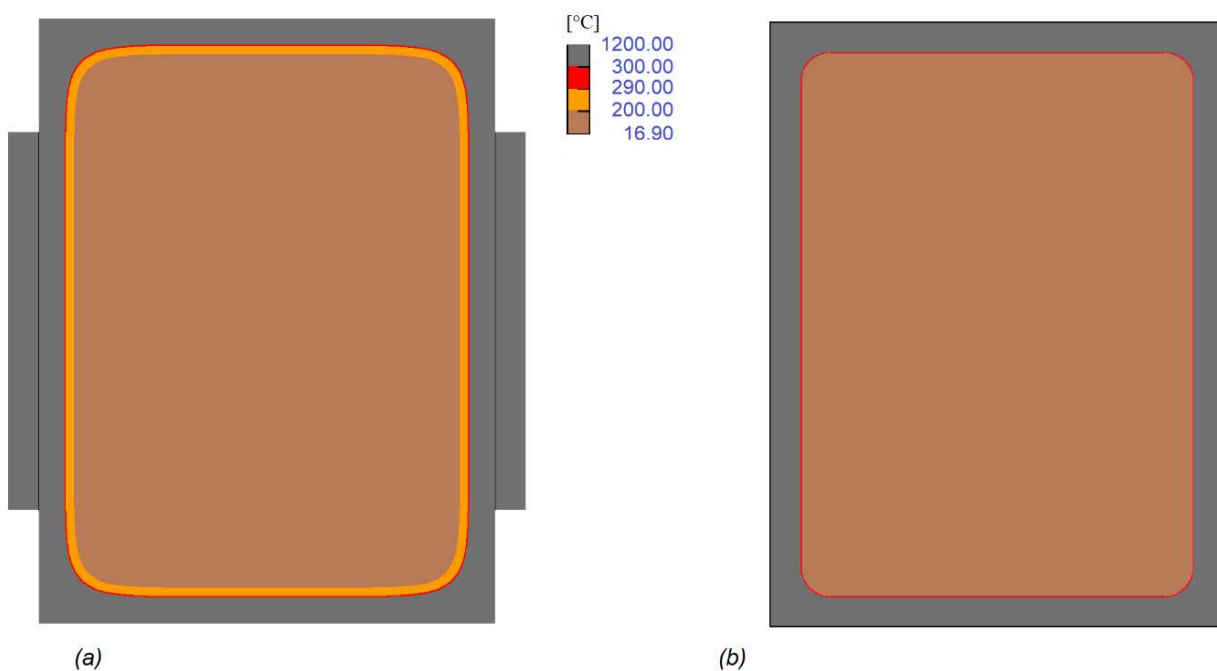
Graf 32 Hloubka zuhelnatění z analytického výpočtu a ze softwaru Atena pro trám 1 a 2

Na grafu (Graf 32) lze vidět, že rychlost zuhelnatění experimentálního trámu číslo 1, 2 zatíženého nominální normovou křivkou je v případě tepelné analýzy softwarem Atena nižší, nežli v případě analytického výpočtu dle ČSN EN 1995-1-2. Z toho vyplývá, že norma je oproti tepelné analýze v softwaru Atena v tomto případě na straně bezpečnosti. Je důležité si však uvědomit, že výpočet dle normy neuvažuje vliv ocelových přílozek, které mohou částečně tepelně izolovat dřevěný průřez. Je tedy možné, že rozdíl hodnot obou výpočtů je způsoben právě uvažováním ocelové příložky v softwaru Atena. Grafické znázornění obou postupů pro časové mezníky 10, 20 a 30 minut je zobrazeno na (Obr. 63 - Obr. 65).

Na grafu (Graf 33) je zobrazen průběh zuhelnatění v případě experimentálního trámu 3 a 4. Z grafu lze odvodit, že rozdíly v hloubce zuhelnatění v případě tepelné analýzy a analytického výpočtu jsou nepatrně menší, což je pravděpodobně způsobeno menší tloušťkou ocelového L-profilu (5 mm) oproti tloušťce ocelových přílozek (8 mm). To vysvětluje i dříve zmíněný fakt,

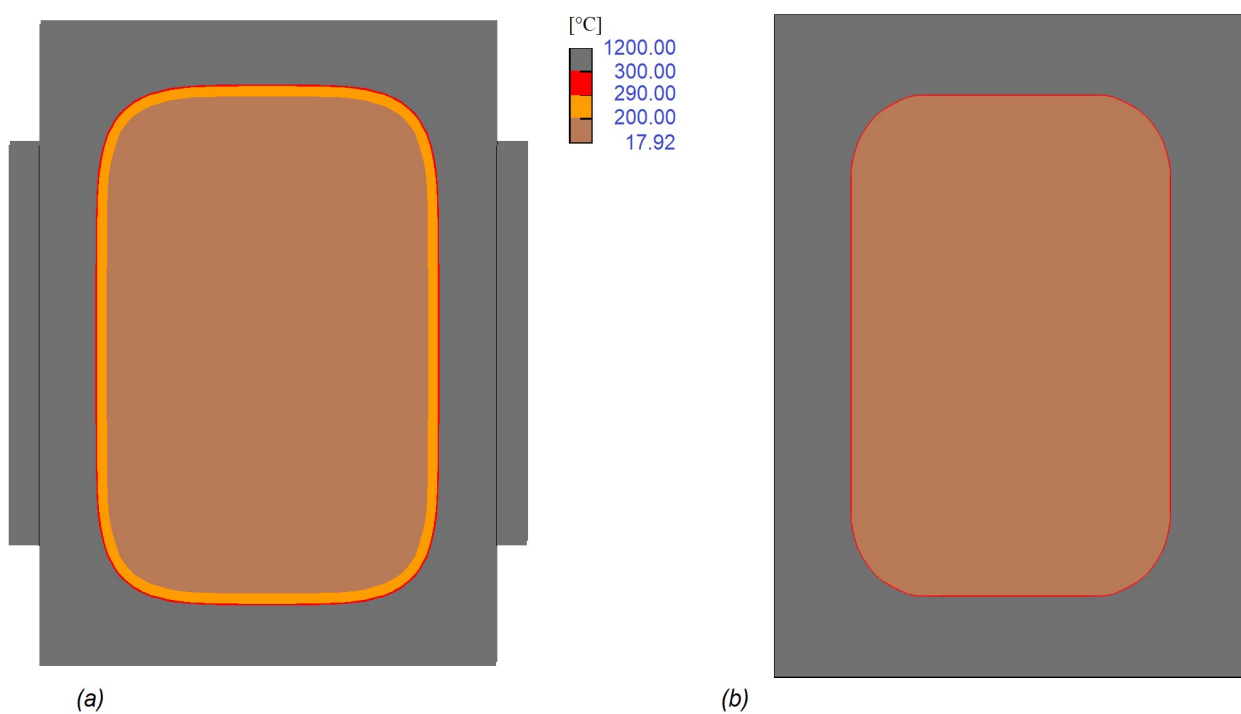
že analytický výpočet nebere v úvahu ochranu dřeva ocelovými spoji. Grafické výstupy ze softwaru Atena pro experimentální trám 3 a 4 jsou zobrazeny na (Obr. 66, Obr. 67).

10 min

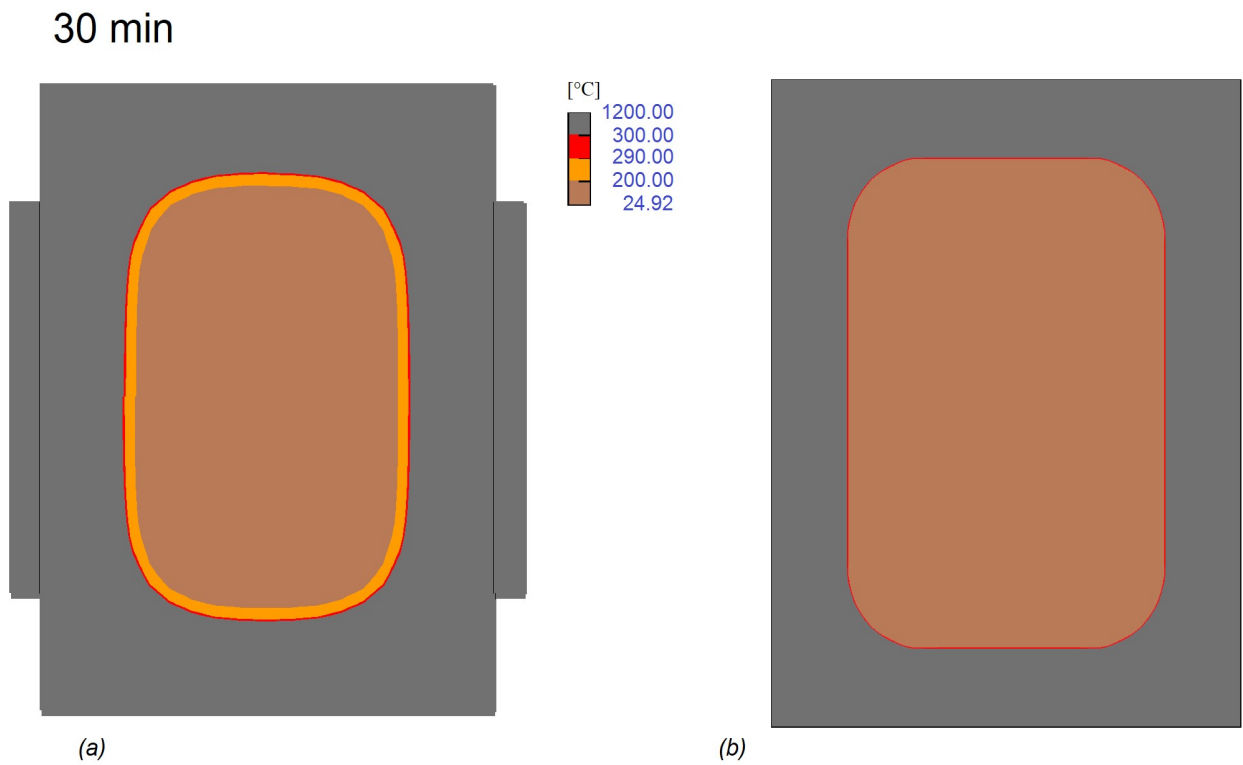


Obr. 63 Porovnání teplot v čase 10 minut na trámu 1,2: (a) Software Atena, (b) Analytický výpočet

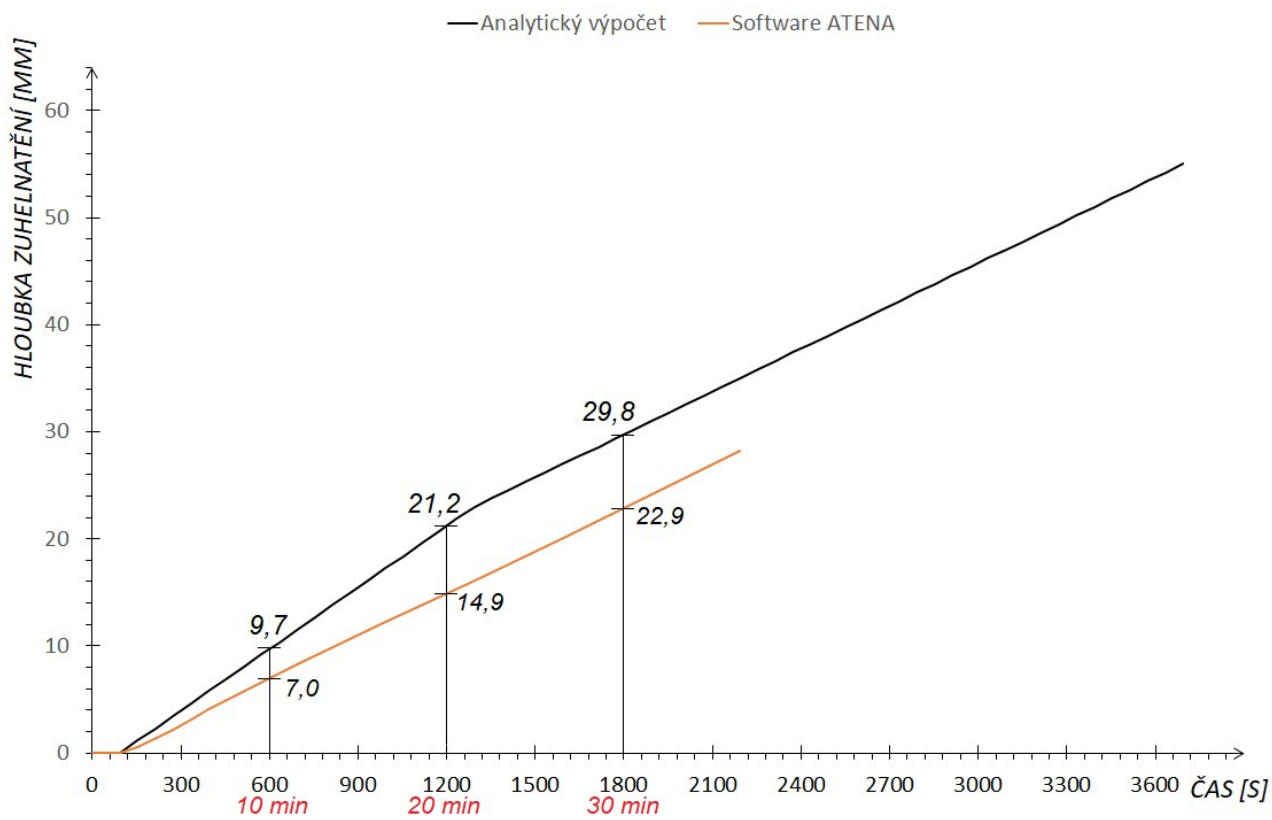
20 min



Obr. 64 Porovnání teplot v čase 20 minut na trámu 1,2: (a) Software Atena, (b) Analytický výpočet

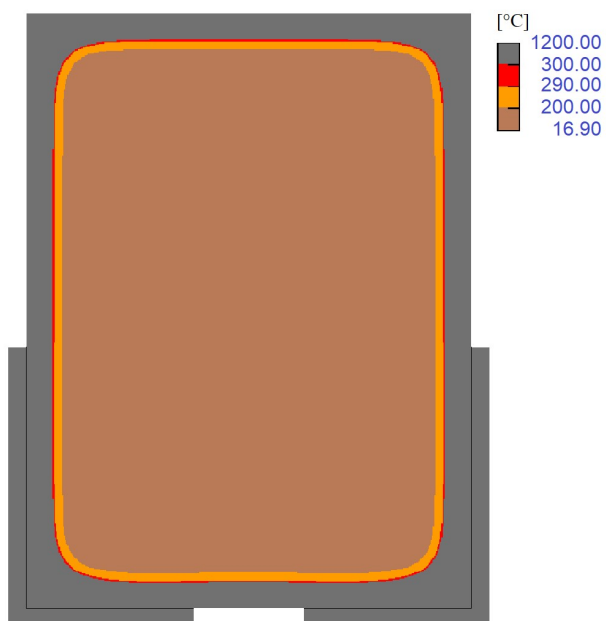


Obr. 65 Porovnání teplot v čase 30 minut na trámu 1,2: (a) Software Atena, (b) Analytický výpočet

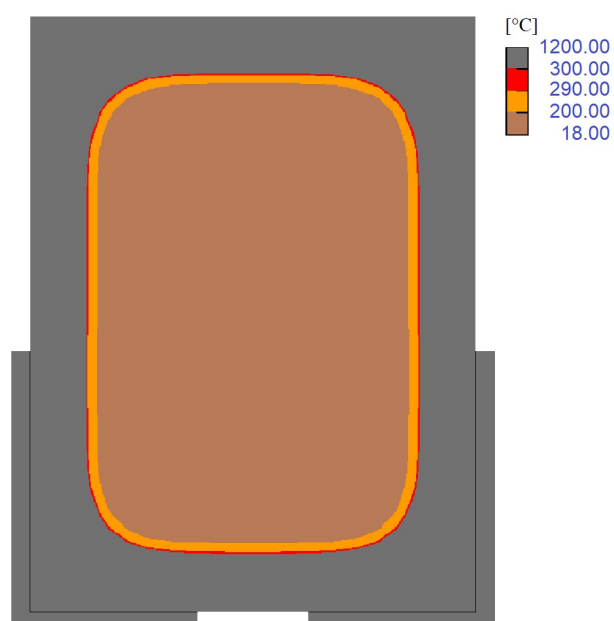


Graf 33 Hloubka zuhelnatění z analytického výpočtu a ze softwaru Atena pro trám 3 a 4

10 min

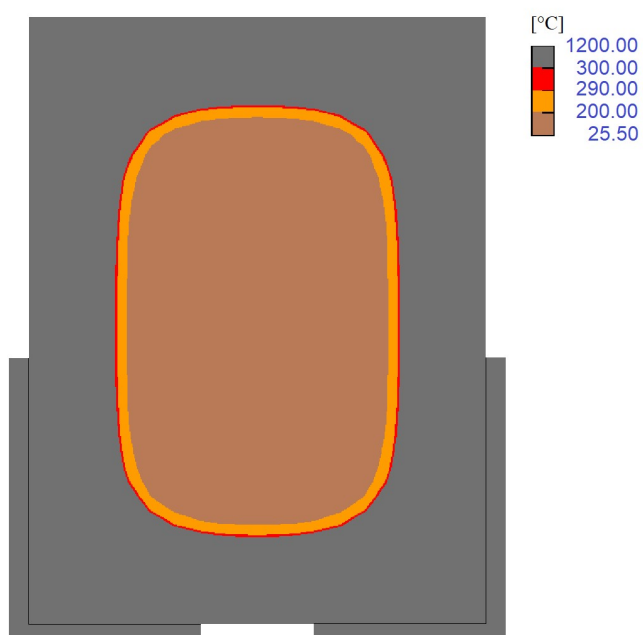


20 min

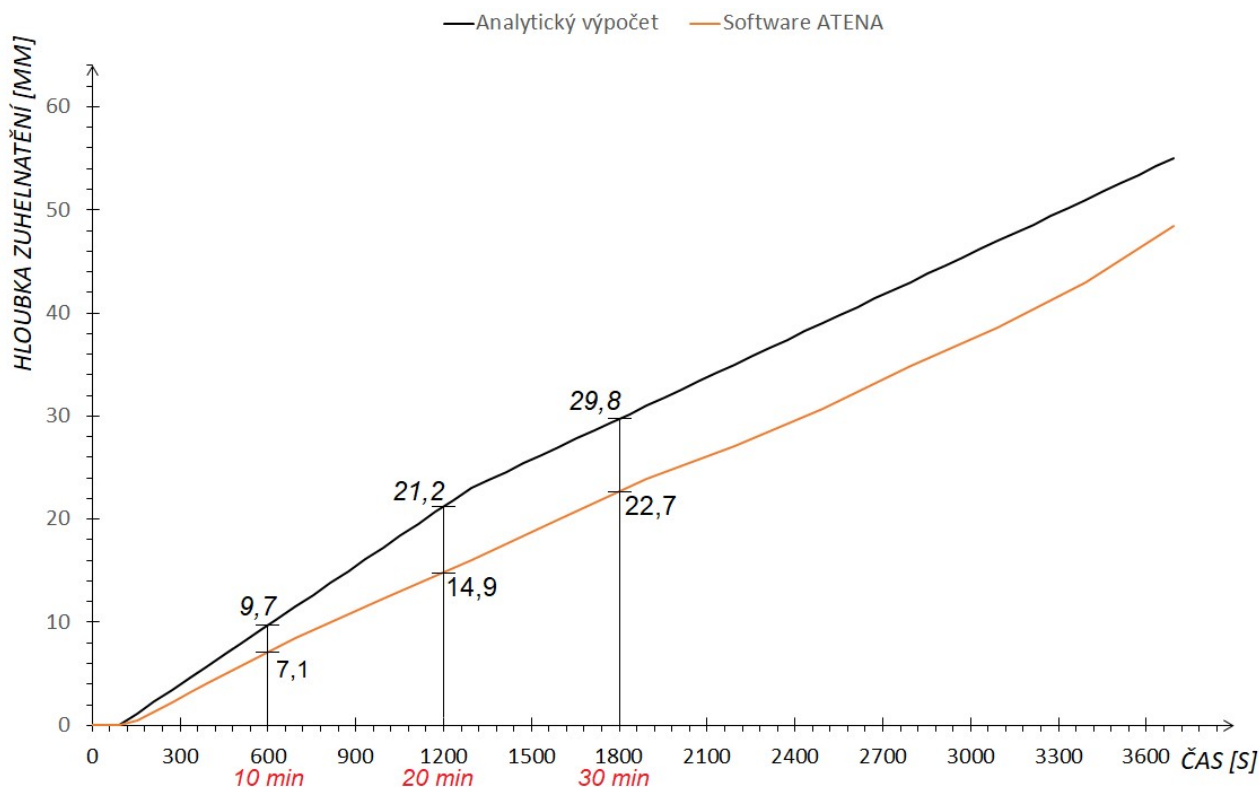


Obr. 66 Teploty v čase 10 a 20 minut na trámu 3,4 v softwaru Atena

30 min



Obr. 67 Teplota v čase 30 minut na trámu 3,4 v softwaru Atena



Graf 34 Hloubka zuhelnatění z analytického výpočtu a ze softwaru Atena pro trám bez spojovacího prostředku

V grafu (Graf 34) je porovnána rychlost zuhelnatění na trám bez spojovacího prostředku v softwaru Atena s výsledkem z analytického výpočtu. Z grafu vyplývá, že rychlost zuhelnatění experimentálního trámu mimo ochranu ocelovým spojovacím prostředkem (Graf 34) je srovnatelná s rychlostí zuhelnatění za spojovacím prostředkem (Graf 32, Graf 33).

S porovnáním grafu (Graf 32) pro průřez s ocelovými příložkami a grafu (Graf 34) vyplývá, že průměrná rychlost zuhelnatění do doby 30 minut od počátku požáru je pod ocelovými příložkami 0,78 mm/min, zatímco u trámu bez ocelových prvků je tato rychlost 0,82 mm/min. Tyto výsledky nám udávají, že ocel není schopná požárně chránit dřevěné prvky.

6 Závěr

Cílem této práce bylo popsat část problematiky spojů dřevěných konstrukcí v rámci požární bezpečnosti staveb. Spoje jsou důležitým aspektem v navrhování dřevěných konstrukcí a vyplývá z toho, že musí být zajištěno jejich funkčnost i v případě mimořádné situace, jakou požár představuje. Pro tyto účely jsme se pokusili matematicky prokázat, že požární odolnost nechráněných dřevěných spojů nemusí být zdaleka tak nízká, jak by se mohlo mylně domnívat.

Byl navržen a posouzen spoj s vnějšími nechráněnými ocelovými příložkami, které jsou ze čtyř stran vystaveny požáru. Tento spoj byl analyticky posouzen na účinky požáru, kde jsme zjistili požární odolnost spoje R 30, kterou nám udává ČSN EN 1995-1-2 pro spoj pomocí svorníků a dále jsme spočetli kritickou teplotu ocelových prvků, která nabyla hodnoty 1135 °C. Pomocí přírůstkové metody bylo zjištěno, že v čase požární odolnosti 30 minut dosahuje teplota ocelového prvku hodnoty 837,9 °C.

Byla provedena velkorozměrovou požární zkoušku s cílem objasnit chování dřevěných prvků a ocelových spojovacích prostředků v porovnání s matematickými modely. Velké rozdíly výsledných dat z experimentu, tepelné analýzy softwarem Atena a analytickým výpočtem jsme se snažili vysvětlit. Bohužel bylo zjištěno, že požár simulovaný v matematických modelech a požární scénář reprezentovaný požárem slaměného objektu se v mnoha případech chovají velice odlišně. Bylo zjištěno, že matematické modely stojí většinou na straně bezpečnosti. Požární bezpečnost staveb by měla více využívat reálných velkorozměrových požárních testů v reálných podmínkách nežli se pouze spoléhat na matematické modely, či experimenty prováděné v požární peci, kde nelze dostatečně zavést vlivy na průběh požáru jako proudění vzduchu vlivem povětrnosti či stavebními otvory, nekonzantní teploty atd.

Výsledky tepelné analýzy experimentálního trámu se spojením pomocí ocelové příložky tl. 8 mm, či L-profilem tl. 5 mm a samotného průřezu bez spojovacího prostředku dokázaly, že ocel chránící dřevěný prvek nemá velký vliv na rychlost zuhelnatění dřevěných trámů. Ocel tedy nelze považovat za požární ochranu dřeva, jelikož dřevěný prvek chráněný ocelovou příložkou měl dle výpočtu softwarem Atena pouze o 0,03 mm/min nižší rychlost zuhelnatění samotný trám.

Seznam obrázků

| | | |
|---------|---|----|
| Obr. 1 | Tvary hřebíků: (a) kruhový drátěný hřebík, (b) šroubový hřebík, (c) drážkový hřebík, (d) zásobník hřebíků pro strojní zařízení (4) | 2 |
| Obr. 2 | Svorník pro dřevěné konstrukce (5)..... | 3 |
| Obr. 3 | Čtvercová podložka pro svorník (5) | 3 |
| Obr. 4 | Kolíkový spoj „dřevo – dřevo“ (5) | 4 |
| Obr. 5 | Kolíkový spoj „ocelový plech – dřevo“ (5) | 4 |
| Obr. 6 | (a) Klasický vrut, (b) Stavební vrut (5)..... | 5 |
| Obr. 7 | (a) Hmoždíky dřevěné, (b) hmoždíky kovové (5) | 5 |
| Obr. 8 | Hmoždíky typu Bulldog oboustranné (5) | 6 |
| Obr. 9 | Deska s prolisovanými trny (5)..... | 6 |
| Obr. 10 | Spoje s tvarovými součástmi (5)..... | 7 |
| Obr. 11 | Konvexní (kroužkový) hřebík (5) | 7 |
| Obr. 12 | Trám napadený tesaříkem (8) | 9 |
| Obr. 13 | Krokev napadané hnilobou (8) | 9 |
| Obr. 14 | Povrchové zvětrávání srubu (8) | 10 |
| Obr. 15 | Prasklina vlivem sesychání může být vstupní branou pro dřevokazný hmyz (8) .. | 11 |
| Obr. 16 | Příložkování dřevěných prvků pomocí příložek: (a) dřevěných, (b) ocelových (8). | 12 |
| Obr. 17 | Výškové nastavení stropního trámu vrstvou polymerbetonu (8)..... | 13 |
| Obr. 18 | Aplikace uhlíkových vláken do trámu (8) | 13 |
| Obr. 19 | Tesařské spoje: (a) rovný plátový spoj, (b) nůžkový plátový spoj, (c) křížový plátový spoj, (d) šikmý plátový spoj, (e) zaklínovaný šikmý plátový spoj (8)..... | 14 |
| Obr. 20 | Beta metoda protézování (8)..... | 14 |
| Obr. 21 | Dřevěné plomby používané při opravě tesařských spojů: (a) zasunutý čep, (b) lokální plomba u dlabu, (c) plomba s funkcí čepu (8) | 15 |
| Obr. 22 | Změna dřeva za požáru: (a) vrstva zuhelnatělého dřeva, (b) vrstva pyrolýzy, (c) vrstva tepelně nezměněného dřeva (6) | 19 |
| Obr. 23 | Zbytkový a účinný průřez (6) | 22 |
| Obr. 24 | Nechráněný spoj pomocí vnějších ocelových příložek..... | 26 |
| Obr. 25 | Nechráněný spoj pomocí vnějších ocelových „L“ profilů..... | 26 |
| Obr. 26 | Příprava betonových základových patek | 27 |
| Obr. 27 | Schéma konstrukce dřevěného věnce | 27 |

| | | |
|---------|--|----|
| Obr. 28 | Namontovaný dřevěný věnec na betonové patky | 28 |
| Obr. 29 | Dveřní otvory ukotvené do věnce | 28 |
| Obr. 30 | Vystavěné slaměné bloky | 29 |
| Obr. 31 | Výstavba střechy | 29 |
| Obr. 32 | Schéma umístění šroubů | 30 |
| Obr. 33 | Schéma umístění L-profilů | 31 |
| Obr. 34 | Schéma umístění experimentálních trámů: (a) půdorys; (b) řez | 31 |
| Obr. 35 | Umístění termočlánků: (a) experimentální trám 1 a 2, (b) experimentální trám 3 a 4 | 32 |
| Obr. 36 | Fotografie zapojení termočlánku do experimentálních trámů 1 a 2 | 33 |
| Obr. 37 | Fotografie zapojení termočlánků do experimentálního trámu 3 a 4 | 34 |
| Obr. 38 | Fotografie slaměného objektu před započítím požární zkoušky | 35 |
| Obr. 39 | Pohled na objekt při experimentu: $t = 4 \text{ min}$, $\theta_g = 198,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ | 36 |
| Obr. 40 | Pohled na objekt při experimentu: $t = 9 \text{ min}$, $\theta_g = 709,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ | 36 |
| Obr. 41 | Pohled na objekt při experimentu: $t = 13 \text{ min}$, $\theta_g = 750,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ | 37 |
| Obr. 42 | Pohled na objekt při experimentu: $t = 31 \text{ min}$, $\theta_g = 1056,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ | 37 |
| Obr. 43 | Pohled na trám 1,2 při experimentu: $t = 39 \text{ min}$, $\theta_g = 1065,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ | 38 |
| Obr. 44 | Pohled na objekt při experimentu: (a) $t = 67 \text{ min}$, (b) $t = 84 \text{ min}$ | 38 |
| Obr. 45 | Deformace spojovacích materiálů po experimentu | 39 |
| Obr. 46 | Schéma posuzovaného nosníku | 44 |
| Obr. 47 | Schéma použitého průřezu pro výpočet součinitele průřezu (3) | 49 |
| Obr. 48 | Schéma tvarů průřezu v softwaru GiD | 52 |
| Obr. 49 | Vlastnosti oceli při teplotě $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ | 53 |
| Obr. 50 | Nastavení počáteční teploty oceli | 53 |
| Obr. 51 | Nadefinování funkcí součinitele tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity v závislosti na teplotě pro ocel | 54 |
| Obr. 52 | Vlastnosti dřeva při teplotě $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ | 54 |
| Obr. 53 | Nadefinování funkcí součinitele tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity v závislosti na teplotě pro dřevo | 55 |
| Obr. 54 | Rozložení materiálů po průřezu | 56 |
| Obr. 55 | Poloha měřících bodů a vyznačení částí průřezu zatížených změnou teploty | 56 |
| Obr. 56 | Definování parametrické teplotní křivky dle experimentu | 57 |
| Obr. 57 | Definování normové teplotní křivky | 58 |

| | | |
|---------|---|----|
| Obr. 58 | Vytvořená výpočetní síť (mesh) | 59 |
| Obr. 59 | Výpočet v softwaru Atena | 59 |
| Obr. 60 | Model průřezu se spojem s dvěma L-profilů v softwaru GiD | 60 |
| Obr. 61 | Ochlazování prostoru mezi materiály | 68 |
| Obr. 62 | Řez objektem s vyznačením proudění horkých plynů vlivem stavebních otvorů | 69 |
| Obr. 63 | Porovnání teplot v čase 10 minut na trámu 1,2: (a) Software Atena, (b) Analytický výpočet | 73 |
| Obr. 64 | Porovnání teplot v čase 20 minut na trámu 1,2: (a) Software Atena, (b) Analytický výpočet | 73 |
| Obr. 65 | Porovnání teplot v čase 30 minut na trámu 1,2: (a) Software Atena, (b) Analytický výpočet | 74 |
| Obr. 66 | Teploty v čase 10 a 20 minut na trámu 3,4 v softwaru Atena | 75 |
| Obr. 67 | Teplota v čase 30 minut na trámu 3,4 v softwaru Atena | 75 |

Seznam tabulek

| | | |
|--------|--|----|
| Tab. 1 | Rychlost zuhelnatění β_0 pro dřevo (10) | 21 |
| Tab. 2 | Změřené charakteristiky dřeva..... | 30 |
| Tab. 3 | Čas kolapsu experimentálních trámů..... | 39 |
| Tab. 4 | Výstup z tabulkového procesoru pro výpočet teploty oceli..... | 50 |
| Tab. 5 | Součinitel tloušťky vrstvy nulové pevnosti k_0 pro nechráněné povrchy (9)..... | 51 |
| Tab. 6 | Výstup z tabulkového procesoru pro výpočet účinného průřezu..... | 51 |

Seznam grafů

| | | |
|--------|---|----|
| Graf 1 | Fáze rozvoje požáru (9) | 16 |
| Graf 2 | Teplota pod vrstvou pyrolýzy dřeva při nominálním normovém požáru (9) | 20 |
| Graf 3 | Vývoj tepelné vodivosti dřeva v závislosti na teplotě (10)..... | 20 |
| Graf 4 | Vývoj měrné tepelné kapacity dřeva v závislosti na teplotě (10) | 21 |
| Graf 5 | Mez úměrnosti pro oceli při zvýšených teplotách (9)..... | 23 |
| Graf 6 | Rozptyl meze kluzu oceli (9) | 23 |
| Graf 7 | Závislost měrného tepla uhlíkové oceli na teplotě (9)..... | 24 |
| Graf 8 | Závislost tepelné vodivosti na teplotě (9)..... | 24 |
| Graf 9 | Graf tepelného rozvoje plynu při experimentu s porovnáním s normovou teplotní křivkou | 40 |

| | | |
|---------|--|----|
| Graf 10 | Teplota termočlánku 1 a 4 v závislosti na čase (data z velkorozměrové požární zkoušky)..... | 40 |
| Graf 11 | Teplota termočlánku 2 a 5 v závislosti na čase (data z velkorozměrové požární zkoušky)..... | 41 |
| Graf 12 | Teplota termočlánku 3 a 6 v závislosti na čase (data z velkorozměrové požární zkoušky)..... | 41 |
| Graf 13 | Teplota termočlánku 7 a 10 v závislosti na čase (data z velkorozměrové požární zkoušky)..... | 42 |
| Graf 14 | Teplota termočlánku 8 a 11 v závislosti na čase (data z velkorozměrové požární zkoušky)..... | 42 |
| Graf 15 | Teplota termočlánku 12 v závislosti na čase (data z velkorozměrové požární zkoušky)..... | 43 |
| Graf 16 | Teplota plynu při experimentu vs. teplota plynu zadávaná do softwaru | 61 |
| Graf 17 | Teplota termočlánku 1 v závislosti na čase (data výpočet Atena)..... | 61 |
| Graf 18 | Teplota termočlánku 2 v závislosti na čase (data výpočet Atena)..... | 62 |
| Graf 19 | Teplota termočlánku 3 v závislosti na čase (data výpočet Atena)..... | 62 |
| Graf 20 | Teplota termočlánku 7 v závislosti na čase (data výpočet Atena)..... | 63 |
| Graf 21 | Teplota termočlánku 8 v závislosti na čase (data výpočet Atena)..... | 63 |
| Graf 22 | Teplota termočlánku 9 v závislosti na čase (data výpočet Atena)..... | 64 |
| Graf 23 | Porovnání teplot na termočlánku 1 a 4 na experimentálním tramu 1,2 | 65 |
| Graf 24 | Porovnání teplot na termočlánku 2 a 5 na experimentálním tramu 1,2 | 65 |
| Graf 25 | Porovnání teplot na termočlánku 3 a 6 na experimentálním tramu 1,2 | 66 |
| Graf 26 | Porovnání teplot na termočlánku 7 a 10 na experimentálním tramu 3,4 | 66 |
| Graf 27 | Porovnání teplot na termočlánku 8 a 11 na experimentálním tramu 3,4 | 67 |
| Graf 28 | Porovnání teplot na termočlánku 12 na experimentálním tramu 4 | 67 |
| Graf 29 | Závislost hloubky zuhelnatění na čase..... | 70 |
| Graf 30 | Naměřená teplota termočlánku 1 a 4 na experimentálním tramu 1,2 | 71 |
| Graf 31 | Naměřená teplota na termočlánku 12 na experimentálním tramu 4 | 71 |
| Graf 32 | Hloubka zuhelnatění z analytického výpočtu a ze softwaru Atena pro trám 1 a 272 | |
| Graf 33 | Hloubka zuhelnatění z analytického výpočtu a ze softwaru Atena pro trám 3 a 474 | |
| Graf 34 | Hloubka zuhelnatění z analytického výpočtu a ze softwaru Atena pro trám bez spojovacího prostředku | 76 |

Literatura

1. AUGUSTIN, Manfred, Kolbein BELL, Petr KUKLÍK, Anna KUKLÍKOVÁ, Antonín LOKAJ a Miroslav PREMROV. *Příručka 2 - Navrhování dřevěných konstrukcí podle eurokódu 5*. B.m.: Leonardo da Vinci Pilot Projects. 2008
2. KUPILÍK, Václav. Spojení dřevěných konstrukcí za požáru. *Střechy, fasády, izolace*. 2014, **21**, 32–34. ISSN 12120111.
3. ČSN EN 1993-1-2 *Navrhování ocelových konstrukcí. Část 1-2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru*. B.m.: Praha: ÚNMZ. 2006
4. KOŽELOUH, Bohumil. *Dřevěné konstrukce podle Eurokódu 5. STEP 1, STEP 1.*. Zlín: KODR, 1998. ISBN 978-80-238-2620-3.
5. JELÍNEK, Lubomír. *Dřevěné a kovové konstrukce podle ČSN EN 1995-1-1 a ČSN EN 1993-1-1*. Volyně: Vyšší odborná škola a Střední průmyslová škola, 2012. ISBN 978-80-86837-42-0.
6. KUKLÍK, Petr a ČESKÁ KOMORA AUTORIZOVANÝCH INŽENÝRŮ A TECHNIKŮ ČINNÝCH VE VÝSTAVBĚ. *Dřevěné konstrukce*. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2005. ISBN 978-80-86769-72-1.
7. KOŽELOUH, Bohumil. *Dřevěné konstrukce podle Eurokódu 5. STEP 2, STEP 2.*. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2004. ISBN 978-80-86769-13-4.
8. ŠTEFKO, Jozef, Ladislav REINPRECHT, Petr KUKLÍK a Zlatoše BRAUNŠTEINOVÁ. *Dřevěné stavby: konstrukce, ochrana a údržba*. Bratislava: Jaga, 2006. ISBN 978-80-8076-043-4.
9. WALD, František. *Výpočet požární odolnosti stavebních konstrukcí*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 978-80-01-03157-5.
10. ČSN EN 1995-1-2 *Navrhování dřevěných konstrukcí. Část 1-2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru*. B.m.: Praha: ÚNMZ. 2006
11. ČSN EN 1995-1-1 *Navrhování dřevěných konstrukcí. Část 1-1: Obecná pravidla – Společná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. B.m.: Praha: ÚNMZ. 2006